



**Maria João Sá Oliveira da Silva Banha**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

## **Avaliação e Quantificação do Transporte Longilitoral no Arco Caparica-Espichel**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Doutor Francisco Sancho, Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de  
Engenharia Civil

Co-orientadora: Professora Doutora, Maria Graça Neves, Professora Auxiliar, Faculdade  
de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Arguente: Prof. Doutor António Carmona Rodrigues

Vogal: Doutor Francisco Sancho



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Outubro, 2018**



### **Avaliação e Quantificação do Transporte Longilitoral no arco Caparica-Espichel**

Copyright © Maria João Sá Oliveira da Silva Banha, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

---

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, ao Doutor Francisco Sancho e à Professora Maria Graça, que estiveram sempre presentes e disponíveis para me ajudarem em todas as fases da minha dissertação. Foi um tema que me fez sair da minha zona de conforto, e o apoio deles foi incondicional, e foi de facto um enorme prazer e privilégio tê-los como meus orientadores.

Também gostaria de agradecer ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, por me ter acolhido, pelas instalações e meios fornecidos para poder realizar este trabalho.

Um grande agradecimento também à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e a todos os que nela trabalham, por ter sido um lugar crucial de aprendizagem e crescimento.

A todos os funcionários e gerentes do restaurante CORROIANA – RESTAURAÇÃO – RÁPIDA, S.A, que me apoiaram em tempos não tão bons, a toda a equipa, obrigada.

Queria também deixar um agradecimento especial a todos os meus amigos que fui conhecendo ao longo destes anos, em especial: Ana Rita Rodrigues, “Badjancas”, Bruna da Gama, Cátia Rodriguez, Daniela Lopes, Ema Barradas, Fernanda Ramos, João Brito, Márcia Carvalho, Marta Martins, Pedro Figueiredo, Raquel Marques, Vítor Lima, e tantos outros. À minha equipa, o NTA, André Moleiro, Carolina Mendes, Diana Bordalo, Duarte Brandão, Elói Martins, Filipe Martins, Joana Parreira, Micael Beco, Miguel Faria, Nuno Pombo, Ricardo Morgado e Tiago Monteiro.

Quero ainda deixar dois agradecimentos especiais. Ana Filipa Breia, não posso dizer que cheguei onde cheguei sem a tua ajuda e força para terminar o curso, e Fernando Oliveira, acompanhaste o meu percurso do início ao fim e sem o teu apoio constante e motivação ao longo de todos estes anos, teria sido um caminho muito mais complicado. Ambos foram pessoas essenciais tanto no meu percurso académico como pessoal, como tal, aos dois, muito obrigada.

Finalmente, deixo um grande agradecimento à minha família, pelo esforço e dificuldade que passaram para eu poder ter todas estas oportunidades. Estarei eternamente grata.



# Resumo

---

O sentido e a predominância do transporte longilitoral ao longo do arco Caparica-Espichel, apesar dos diversos estudos já realizados, são ainda controversos na comunidade científica. Como tal, na presente dissertação pretende-se analisar em detalhe a variabilidade espacial e temporal da agitação marítima e do transporte sedimentar longilitoral, quer médios quer nos períodos de inverno e de verão, com a finalidade de dar um novo contributo ao problema em estudo.

Para tal, é utilizado um conjunto de dados de agitação marítima, provenientes de simulações do modelo WW3 (WaveWatch III), obtidos por Dodet *et al.* (2010) [1], num intervalo de tempo de 65 anos, compreendidos entre 1948 e 2012. Com o modelo numérico SWAN propagou-se a agitação do largo até à costa para todo o arco Caparica-Espichel e avaliaram-se as condições de agitação à profundidade aproximada de 5.0 m, ao longo desse conjunto de anos e nos diferentes períodos sazonais. Com base nestas séries de dados, calcularam-se os respetivos fluxos sedimentares longitudinais através das expressões empíricas de CERC e Kamphuis.

Os resultados obtidos sugerem uma predominância de transporte dirigido de Norte para Sul no trecho central do arco litoral Caparica-Espichel (aproximadamente entre a Praia da Rainha e a Lagoa de Albufeira), contrariando a maioria dos resultados dos estudos anteriores. Nos trechos a norte e a sul daquele o transporte longilitoral dominante é dirigido para Norte. Verifica-se ainda uma flutuação espacial dos valores médios anuais do fluxo sedimentar em torno do valor nulo, sugerindo uma grande sensibilidade dos resultados obtidos às condições locais (de agitação e de orientação da linha de costa).

**Palavras-chave:** Transporte Longilitoral, Swan, agitação marítima, fluxo sedimentar, Caparica-Espichel.

---





# Abstract

---

The direction and predominance of the longshore sediment transport in the Caparica-Espichel littoral cell is still a controversial subject within the scientific community despite several studies already carried out. Therefore, this presentation intends to analyze, in a more detailed way, the spatial and temporal variability of the wave climate and longshore transport, annually and in the winter/summer periods, in order to give a new contribution to the problem under study.

To do so, a set of wave climate data was used, derived from simulations of the WW3 model (WaveWatch III) obtained by Dodet *et al.* (2010) [1], for a period of 65 years, between 1948 and 2012. The use of a numerical model, SWAN, enabled to propagate the wave conditions from offshore to the nearshore region, for the whole Caparica-Espichel coastal stretch, where the wave conditions were evaluated at a depth of approximately 5.0 m, for the total above mentioned time period and in the different seasonal periods. Based on these data series, the longshore drift (or sedimentary transport) was calculated using the empirical expressions of CERC and Kamphuis.

The results suggest a north-to-south transport tendency in the central stretch of the Caparica-Espichel costal arch (approximately between Rainha's beach and Lagoa de Albufeira), contradicting previous studies. The opposite occurs in the arch extremities, where the longshore transport is directed towards the north. There is also a spatial fluctuation of the annual mean values around zero, which suggests a high sensitivity of the results obtained to local conditions (wave climate and coastline orientation).

**Keywords:** Longshore transport, SWAN, wave climate, sedimentary flow, Caparica-Espichel.

---



# Conteúdo

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Motivação e Enquadramento do Tema .....</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Objetivos.....</i>	<i>1</i>
1.3. <i>Plano de Trabalhos e Organização da Dissertação .....</i>	<i>1</i>
<b>2. TRANSPORTE LONGILITORAL NO ARCO CAPARICA-ESPICHEL.....</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Generalidades .....</i>	<i>3</i>
2.2. <i>Evolução da Linha de Costa no Arco Caparica-Espichel .....</i>	<i>3</i>
2.3. <i>Agitação Marítima e Deriva Litoral no Arco Caparica-Espichel.....</i>	<i>5</i>
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>9</b>
3.1. <i>Generalidades .....</i>	<i>9</i>
3.2. <i>Obtenção dos Dados à Profundidade de 5m.....</i>	<i>9</i>
3.3. <i>Direção Perpendicular à Linha de Costa.....</i>	<i>14</i>
3.4. <i>Quantificação do Transporte Longilitoral.....</i>	<i>15</i>
3.5. <i>Análise da Variabilidade da Agitação e do Transporte Sedimentar.....</i>	<i>17</i>
<b>4. VARIABILIDADE DA AGITAÇÃO MARÍTIMA .....</b>	<b>19</b>
4.1. <i>Generalidades .....</i>	<i>19</i>
4.2. <i>Variabilidade Espacial .....</i>	<i>19</i>
4.3. <i>Variação Sazonal.....</i>	<i>23</i>
4.4. <i>Variação Temporal .....</i>	<i>26</i>
<b>5. TRANSPORTE LONGILITORAL DE SEDIMENTOS.....</b>	<b>31</b>
5.1. <i>Generalidades .....</i>	<i>31</i>
5.2. <i>Variabilidade Espacial .....</i>	<i>31</i>
5.3. <i>Variabilidade Sazonal.....</i>	<i>37</i>
5.4. <i>Variabilidade Temporal.....</i>	<i>40</i>
5.5. <i>Análise e Comparação de Resultados com os de Taborda et al. (2014).....</i>	<i>43</i>
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>49</b>
6.1. <i>Principais Conclusões.....</i>	<i>49</i>
6.2. <i>Desenvolvimentos Futuros.....</i>	<i>50</i>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>53</b>



# Índice de Figuras

FIGURA 1 - RECUO E DESAPARECIMENTO DA RESTINGA LOCALIZADA A NORTE DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL – RETIRADA DE RODRIGUES (2003) [1].	4
FIGURA 2 – GALGAMENTO (C) E INUNDAÇÃO (D) NAS PRAIAS DA COSTA DA CAPARICA DURANTE A TEMPESTADE “HÉRCULES” DE 2014 (ADAPTADA DE SILVA <i>ET AL.</i> ).	5
FIGURA 3 - BALANÇO SEDIMENTAR NO ARCO LITORAL OESTE DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL (RETIRADO DE TABORDA E ANDRADE, 2014).	6
FIGURA 4 - TRECHO COSTEIRO OBJETO DE ESTUDO, COM IDENTIFICAÇÃO DO PONTO CUJOS DADOS FORAM USADOS PARA PROPAGAR A AGITAÇÃO MARÍTIMA DO LARGO PARA A COSTA (GOOGLE EARTH PRO 7.1.7.2606, ACEDIDO EM 14/09/2018, ©2018 GOOGLE, IMAGEM DE 14-12-2015).	10
FIGURA 5 - TRECHO COSTEIRO OBJETO DE ESTUDO, COM IDENTIFICAÇÃO DO DOMÍNIO DE CÁLCULO DO MODELO SWAN E BATIMETRIA SUBJACENTE (EXTRAÍDO DE SANCHO <i>ET AL.</i> , 2017).	11
FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DOS 36 PONTOS DE ESTUDO AO LONGO DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL	12
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE COSTA (LARANJA) DA ZONA DA LAGOA DE ALBUFEIRA E DE ALGUNS DOS PONTOS DE ESTUDO.	14
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DO ÂNGULO ( $\tau=53,86^\circ$ ) NO PONTO 2, COMPARATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA.	15
FIGURA 9 – EVOLUÇÃO DO RUMO AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO, DE NORTE PARA SUL.	20
FIGURA 10 – EVOLUÇÃO DO ÂNGULO DA DIREÇÃO PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, $\tau$ , COM O NORTE, AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO, DE NORTE PARA SUL (CORRESPONDENDO NO GRÁFICO DA ESQUERDA PARA A DIREITA).	20
FIGURA 11 – PORMENOR DO SALIENTE EXISTENTE NO ARCO LITORAL CAPARICA-CABO ESPICHEL (GOOGLE EARTH PRO 7.1.7.2606, ACEDIDO EM 14/09/2018, ©2018 GOOGLE, IMAGEM DE 14-12-2015).	21
FIGURA 12 - EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO MÉDIA DA AGITAÇÃO MARÍTIMA RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO: MÉDIA TOTAL.	21
FIGURA 13 – EVOLUÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO, DE NORTE PARA SUL.	22
FIGURA 14 – EVOLUÇÃO DO PERÍODO DE PICO MÉDIO AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO, DE NORTE PARA SUL.	23
FIGURA 15 – EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO DA ONDA RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO: MÉDIA TOTAL, NO PERÍODO DE INVERNO E NO PERÍODO DE VERÃO.	24
FIGURA 16 – EVOLUÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO: MÉDIA TOTAL, NO PERÍODO DE INVERNO E NO PERÍODO DE VERÃO.	24
FIGURA 17 - EVOLUÇÃO DO RUMO AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO, PARA CADA GRUPO TRIMESTRAL, DE NORTE PARA SUL.	25
FIGURA 18 - EVOLUÇÃO DA ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO, PARA CADA GRUPO TRIMESTRAL, DE NORTE PARA SUL.	26

FIGURA 19 - EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO DA ONDA RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO: JANEIRO-FEVEREIRO-MARÇO (JFM); ABRIL-MAIO-JUNHO (AMJ); JULHO-AGOSTO-SETEMBRO (JAS); OUTUBRO- NOVEMBRO-DEZEMBRO (OND). .....	26
FIGURA 20 - PONTOS DE ESTUDO AO LONGO DO ARCO, ORDENADOS DE NORTE PARA SUL. ....	27
FIGURA 21 - EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO MÉDIA POR TRIMESTRE DA AGITAÇÃO RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, NO PONTO A (EC7). ....	28
FIGURA 22 - EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO MÉDIA POR TRIMESTRE DA AGITAÇÃO RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, NO PONTO B (PRAIA DA RAINHA). ....	28
FIGURA 23 - EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO MÉDIA POR TRIMESTRE DA AGITAÇÃO RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, NO PONTO C (FONTE DA TELHA). ....	28
FIGURA 24 - EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO MÉDIA POR TRIMESTRE DA AGITAÇÃO RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, NO PONTO D (LAGOA DE ALBUFEIRA). ....	29
FIGURA 25 - EVOLUÇÃO DA DIREÇÃO MÉDIA POR TRIMESTRE DA AGITAÇÃO RELATIVAMENTE À PERPENDICULAR À LINHA DE COSTA, NO PONTO E (MECO). ....	29
FIGURA 26 - EVOLUÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA MÉDIA POR TRIMESTRE, NO PONTO A (EC7). ....	29
FIGURA 27 - EVOLUÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA MÉDIA POR TRIMESTRE, NO PONTO B (PRAIA DA RAINHA). ...	30
FIGURA 28 - EVOLUÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA MÉDIA POR TRIMESTRE, NO PONTO C (FONTE DA TELHA). ....	30
FIGURA 29 - EVOLUÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA MÉDIA POR TRIMESTRE, NO PONTO D (LAGOA DE ALBUFEIRA). ....	30
FIGURA 30 - EVOLUÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA MÉDIA POR TRIMESTRE, NO PONTO E (MECO). ....	30
FIGURA 31 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL CALCULADO PELA FÓRMULA DE CERC, AO LONGO DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL, DE NORTE PARA SUL. ....	32
FIGURA 32 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL CALCULADO PELA FÓRMULA DE KAMPHUIS, AO LONGO DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL, DE NORTE PARA SUL. ....	32
FIGURA 33 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL CALCULADO PELA FÓRMULA DE CERC, A ESCALA REDUZIDA, AO LONGO DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL, DE NORTE PARA SUL. ....	33
FIGURA 34 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL CALCULADO PELA FÓRMULA DE KAMPHUIS, A ESCALA REDUZIDA, AO LONGO DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL, DE NORTE PARA SUL. ....	33
FIGURA 35 - LINHAS REPRESENTATIVAS DA DIREÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR - SENTIDO NORTE (VERMELHO); SENTIDO SUL (VERDE). ....	35
FIGURA 36 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE O CAUDAL (M <sup>3</sup> /ANO) CALCULADO PELAS EXPRESSÕES DE CERQ E KAMPHUIS E O RUMO MÉDIO DE ONDA (°). ....	36
FIGURA 37 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE O CAUDAL (M <sup>3</sup> /ANO) CALCULADO PELAS EXPRESSÕES DE CERQ E KAMPHUIS E A ALTURA SIGNIFICATIVA MÉDIA DE ONDA (M). ....	36
FIGURA 38 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE SEDIMENTAR, CALCULADO PELA FÓRMULA DE CERC, AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO: MÉDIA TOTAL, NO PERÍODO DE INVERNO E NO PERÍODO DE VERÃO. ....	38
FIGURA 39 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE SEDIMENTAR, CALCULADO PELA FÓRMULA DE KAMPHUIS, AO LONGO DO LOCAL DE ESTUDO: MÉDIA TOTAL, NO PERÍODO DE INVERNO E NO PERÍODO DE VERÃO. ....	38

FIGURA 40 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL MÉDIO CALCULADO PELA FÓRMULA DE CERC, PARA CADA GRUPO TRIMENSAL, DE NORTE PARA SUL.....	39
FIGURA 41 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL MÉDIO CALCULADO PELA FÓRMULA DE KAMPHUIS, PARA CADA GRUPO TRIMENSAL, DE NORTE PARA SUL.....	40
FIGURA 42 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTAR, CALCULADO PELAS FÓRMULAS DE CERC E KAMPHUIS, NOS PONTOS A E B (EC7 E PRAIA DA RAINHA RESPETIVAMENTE).....	41
FIGURA 43 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTAR, CALCULADO PELAS FÓRMULAS DE CERC E KAMPHUIS, NOS PONTOS C E D (FONTE DA TELHA E LAGOA DE ALBUFEIRA RESPETIVAMENTE).....	42
FIGURA 44 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTAR, CALCULADO PELAS FÓRMULAS DE CERC E KAMPHUIS, NO PONTO E (MECO). ....	43
FIGURA 45 - VARIAÇÃO DO RESÍDUO ANUAL DA DERIVA LITORAL AO LONGO DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL CALCULADA ATRAVÉS DE 6 ESTRATÉGIAS DE MODELAÇÃO DISTINTAS (E1 A E6); VERDE – PARA SUL; VERMELHO – PARA NORTE; IMAGEM RETIRADA DE TABORDA <i>ET AL.</i> (2014) [12]......	44
FIGURA 46 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTAR ENTRE O PERÍODO DE 1970 E 1995, CALCULADO PELAS FÓRMULAS DE CERC E KAMPHUIS, NO PONTO A (EC7). ....	45
FIGURA 47 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTAR ENTRE O PERÍODO DE 1970 E 1995, CALCULADO PELAS FÓRMULAS DE CERC E KAMPHUIS, NOS PONTOS B E C (PRAIA DA RAINHA E FONTE DA TELHA RESPETIVAMENTE).....	46
FIGURA 48 - EVOLUÇÃO DO CAUDAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTAR ENTRE O PERÍODO DE 1970 E 1995, CALCULADO PELAS FÓRMULAS DE CERC E KAMPHUIS, NOS PONTOS D E E (LAGOA DE ALBUFEIRA E MECO RESPETIVAMENTE)....	47
FIGURA 49 - COMPARAÇÃO DOS SENTIDOS DA DERIVA LITORAL AO LONGO DO ARCO CAPARICA-ESPICHEL, ENTRE OS RESULTADOS DE TABORDA E ANDRADE (2014) E OS OBTIDOS NESTA DISSERTAÇÃO. ....	48
FIGURA A 1 – VALOR MÉDIO DO DIÂMETRO DOS SEDIMENTOS DA FACE DA PRAIA, BERMA DA PRAIA E DUNA, RETIRADO DE DIOGO <i>ET AL.</i> , (2013).....	57
FIGURA A 2 – LINHA DE COSTA E RESPETIVOS PONTOS DE ESTUDO OBTIDO PELO PROGRAMA AUTOCAD® .....	59





# Lista de Tabelas

TABELA 1 – PONTOS DE ESTUDO E RESPETIVAS BATIMETRIAS. ....	13
TABELA A 1 – PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS 36 PONTOS ESTUDADOS .....	55



# Lista de Símbolos

$a'$	Percentagem de volume total ocupado por sólidos ( $a'=1$ - porosidade) [%];
$c$	Celeridade da onda [ $m/s$ ];
$D_{50}$	Diâmetro mediano do sedimento [ $mm$ ];
$g$	Aceleração gravítica [ $m/s^2$ ];
$h_5$	Profundidade à batimétrica +5m (ZH) [ $m$ ];
$H_b$	Altura de onda na rebentação [ $m$ ];
$h_b$	Profundidade de onda na rebentação [ $m$ ];
$H_s$	Altura de onda significativa à profundidade de 5m [ $m$ ];
$i$	Declive [°];
$k$	Coeficiente empírico de proporcionalidade [-];
$K_r$	Coeficiente de Refração [-];
$p$	Porosidade [%];
$Q_l$	Caudal sedimentar [ $m^3/ano$ ];
$T_p$	Período de pico da onda [s];
$\theta$	Direção de onda [°];
$\alpha_5$	Ângulo da onda incidente à profundidade de 5m [ $m$ ];
$\alpha_b$	Ângulo da onda incidente na rebentação [°];
$\gamma_b$	Índice de rebentação [-];
$\rho$	Densidade da água [ $Kg/m^3$ ];
$\rho_s$	Densidade dos sedimentos [ $Kg/m^3$ ];
$\tau$	Ângulo da direção perpendicular à linha de costa em relação ao norte cartográfico [°].



# **1. Introdução**

## **1.1. Motivação e Enquadramento do Tema**

Desde sempre que o mar tem uma forte interligação com o desenvolvimento da zona costeira e com as pessoas que contactam com esta regularmente. Contudo, “o mar”, ou melhor, a agitação marítima e a sobrelevação do mar, é também causa de destruição de zonas costeiras, quer durante tempestades marítimas, quer como fenómeno gerador contínuo da deriva litoral e de eventual erosão costeira. No entanto, com o aumento dos fluxos turísticos e até mesmo com as alterações climáticas, têm vindo a surgir novas preocupações relacionadas com a fragilidade do sistema costeiro.

O arco Caparica-Espichel é um exemplo de uma zona costeira com problemas de erosão, em particular no seu extremo setentrional. No entanto, apesar de existirem diversos estudos, ainda existem algumas questões em aberto relativamente ao sentido e predominância do transporte longilitoral ao longo do arco Caparica-Espichel. Como tal, na presente dissertação pretende-se analisar a variabilidade espacial, sazonal e temporal da agitação marítima neste arco, e o correspondente transporte longilitoral de sedimentos, assim como a sua variabilidade espacial e temporal.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal desta dissertação é o de, dando apoio a estudos já realizados por diversos autores relativamente à forma como o transporte de sedimentos se processa em todo o arco Caparica-Espichel, identificar os padrões de agitação marítima local e do respetivo transporte de sedimentos ao longo deste trecho costeiro. Pretende-se responder, genericamente, às perguntas: i) “Qual o sentido dominante do transporte longilitoral, induzido pelas ondas, neste arco costeiro?”; ii) “Existe, ao longo do trecho, algum ponto de inversão do sentido do transporte sedimentar dominante?”; iii) “Qual a magnitude estimada do transporte litoral e como varia neste trecho?”.

## **1.3. Plano de Trabalhos e Organização da Dissertação**

Como forma de organização, esta dissertação será apresentada seguindo as várias etapas que foram percorridas no decorrer do processo de elaboração desta dissertação.

Após este capítulo de Introdução, no capítulo 2 é apresentado uma revisão da bibliografia existente até ao momento relativamente ao transporte longilitoral de sedimentos e às condições de

agitação marítima ao longo do Arco Caparica-Espichel. Aborda-se ainda a problema da erosão costeira verificado neste trecho.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para o cálculo da deriva litoral no arco Caparica-Espichel. Assim, apresenta-se o método como foi propagada a agitação marítima desde o largo, onde se possuíam 65 anos de dados de *hindcast*, até à costa, recorrendo ao programa de modelação SWAN, assim como o método de, com base na agitação junto à costa (mais concretamente, à profundidade de 5m), cálculo do transporte longilitoral. Apresentam-se também as metodologias de análise da variabilidade temporal e espacial dos resultados dos cálculos (anteriores).

A avaliação e quantificação da variabilidade da agitação marítima é abordada no capítulo 4. Neste se apresentam os resultados relativamente à evolução temporal, espacial e sazonal dos parâmetros de agitação marítima, nomeadamente dos rumos e, com base neles, da direção da agitação relativamente à linha de costa e das respetivas alturas significativas.

No capítulo 5 são apresentados os caudais sedimentares calculados com base na agitação marítima à profundidade de 5 m e analisada a sua variabilidade temporal, espacial e sazonal. Estes resultados são ainda comparados com os resultados de outros autores.

Finalmente no capítulo 7, descrevem-se as principais conclusões retiradas durante o trabalho realizado, esperando-se, portanto, atingir os principais objetivos da presente dissertação.

## **2. Transporte Longilitoral no Arco Caparica-Espichel**

### **2.1. Generalidades**

Com a constante evolução e crescimento populacional na zona costeira no arco Caparica-Espichel, aumenta também a preocupação e a necessidade de estudar os diversos processos costeiros, responsáveis pela evolução da linha de costa nessa zona. Esta região sempre teve uma especial importância a nível social, económica e paisagística. No entanto, o aumento significativo do fluxo de turismo e as alterações climáticas que se têm vindo a verificar têm movido diversos autores a avaliar e quantificar a agitação marítima e o transporte sedimentar neste trecho. Apesar destes estudos, ainda não se chegou a um consenso geral no que toca à direção principal do transporte sedimentar ao longo do mesmo. Este é um tema de elevada importância, já que permite, entre outros, apoiar as operações de alimentação artificial que por vezes são necessárias na zona em questão, como tem acontecido na última década nas praias da Costa da Caparica.

No presente capítulo apresenta-se o caso de estudo desta dissertação: o arco litoral Caparica-Espichel. Para tal, apresentam-se os principais estudos realizados anteriormente relativos quer à agitação marítima junto à costa, elemento forçador do transporte sedimentar longilitoral, quer ao transporte sedimentar nesta zona.

### **2.2. Evolução da Linha de Costa no Arco Caparica-Espichel**

Ao longo dos anos, a região litoral da península de Setúbal, também designado por arco Caparica-Espichel, tem sido alvo de sucessivos estudos devido às alterações significativas que têm vindo a ocorrer especialmente na sua morfologia, grande parte devido aos processos costeiros que aí ocorrem, tais como a agitação marítima, o vento, as marés e as tempestades, com repercussões no transporte sedimentar.

“Desde o final do século XIX, este sector sofreu um recuo significativo da linha de costa na zona mais a norte do trecho (entre a Cova do Vapor e a Costa da Caparica), mais especificamente, na restinga que se estendia até à zona do farol do Bugio” [2], Figura 1. Nesta zona ocorre uma forte interação entre o mar a terra e o Rio Tejo, pelo que, desde 1929 até ao presente, este sector já sofreu um recuo total de 3km. Apesar deste conhecimento, neste trabalho considera-se, simplificadamente, somente a ação das ondas sobre o transporte sedimentar na zona de rebentação, não se considerando outros fenómenos tais como a hidrodinâmica das correntes de maré, que são importantes na região da

embocadura. No entanto, nas praias predominam os efeitos das ondas, sendo por isso somente estes considerados

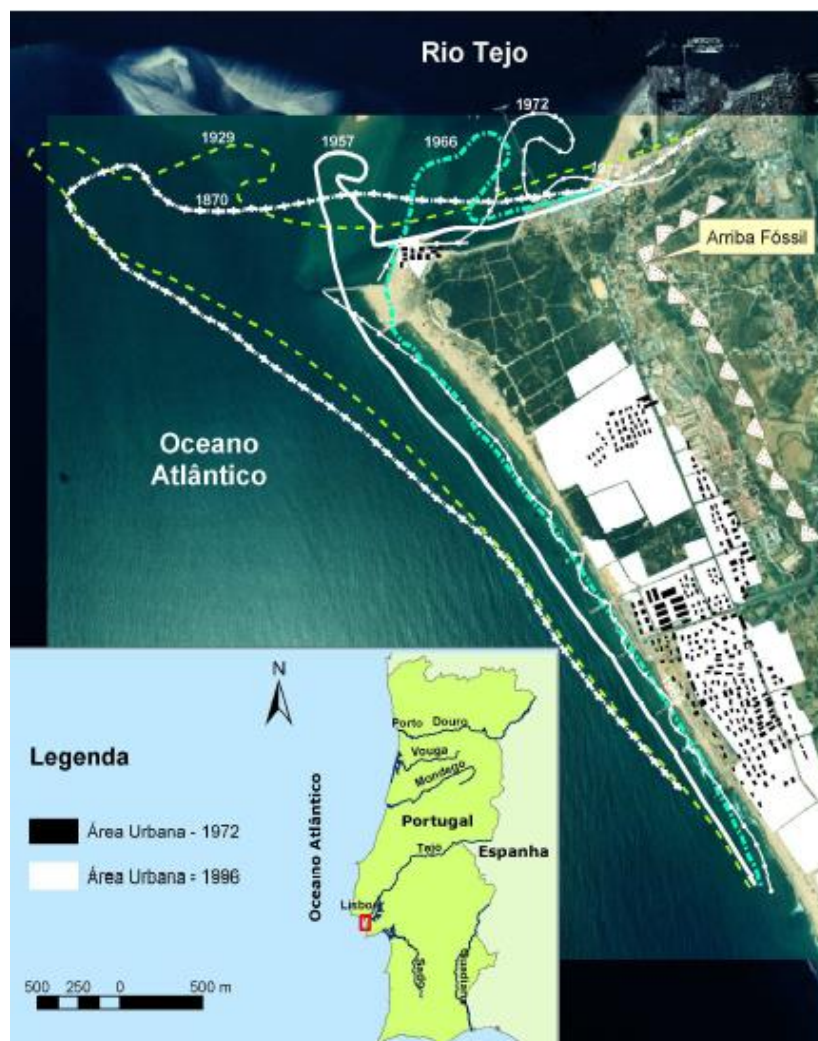


Figura 1 - Recuo e desaparecimento da restinga localizada a norte do arco Caparica-Espichel – retirada de Rodrigues (2003) [1].

Um estudo realizado por Lira *et al.* (2016) [3], reporta que entre o período de 1958 e 2010, existiu uma regressão total máxima no setor norte da Costa da Caparica de  $-4.57 \pm 0.2$  m/ano, enquanto que a mais a sul, na zona do Meco, apresentou uma acumulação, com um máximo de  $+1.20 \pm 0.2$  m/ano.

No entanto, Pinto *et al.* (2015) [4], admitem um recuo de aproximadamente 200m entre 1958 e 2007, correspondendo assim a uma taxa de recuo de -4.0 m/ano.

A elevada taxa de erosão na zona do arco Caparica-Espichel, principalmente no seu extremo norte, levou a que, em meados de 1959 a duna costeira alcançasse uma configuração que expôs a frente urbana às ações diretas do mar, principalmente devido a tempestades, levando à construção de estruturas de defesa a fim de proteger esta área. No entanto, o aumento do fluxo turístico e a degradação natural destas estruturas de proteção, entre outros fatores, levou à perda significativa de areal e a consequente necessidade intervenção, através da “reconstrução e reperfilamento dos



esporões e da defesa aderente (entre 2004 e 2006) e a execução de operações de alimentação artificial” [5].

As condições marítimas no inverno de 2000/2001, provocaram a destruição e desaparecimento de uma grande porção dunar principalmente na zona da praia de São João [2], pelo que, foram realizados diversos trabalhos de reposição de areal de modo a restabelecer a linha costeira afetada. Mais recentemente, em Janeiro de 2014, a tempestade “Hércules” provocou o galgamento das estruturas de proteção e inúmeras inundações nas praias da Costa da Caparica [6], provocando uma erosão muito acentuada na zona, Figura 2, uma vez mais, recorreram-se a processos de reposição do areal e reestruturação das dunas.



Figura 2 – Galgamento (C) e inundação (D) nas praias da Costa da Caparica durante a tempestade “Hércules” de 2014  
(Adaptada de Silva *et al.*),

Estes acontecimentos têm vindo a trazer diversas preocupações no que toca à gestão e desenvolvimento desta zona costeira, como tal, a presente dissertação pretende dar apoio aos estudos realizados anteriormente no âmbito da questão da tendência de transporte longilitoral em todo o arco.

### 2.3. Agitação Marítima e Deriva Litoral no Arco Caparica-Espichel

Ainda são escassos os estudos que se debruçam sobre a temática da agitação marítima e do transporte longilitoral no arco Caparica-Espichel. É necessário um estudo mais aprofundado de modo a que possam ser analisados com mais detalhe os riscos costeiros inerentes a esta região, tais como perigos de erosão e inundações.

A deriva litoral, é um dos fenómenos que fez com que ao longo dos tempos, à escala geológica, este trecho costeiro acabasse por adquirir a configuração arqueada que se observa hoje em dia, desta forma, apresentam-se seguidamente um conjunto de estudos relativos à temática do transporte sedimentar e das condições de agitação marítima da zona.

No trabalho realizado por Ferreira (1999) [7], este autor analisa os parâmetros de agitação marítima e compara resultados de modelação da mesma em diferentes locais do arco litoral, a uma profundidade de 9m, durante aproximadamente um mês no período de inverno marítimo. Os resultados

obtidos mostram que existe uma maior intensidade de agitação marítima em frente ao Cabo Espichel, com uma diferença entre 10 a 15%, quando comparado com as praias da Costa da Caparica.

No âmbito do transporte sedimentar ao longo o arco, os estudos existentes não apresentam as mesmas conclusões no que toca à direção da deriva litoral na região. Dias (1987) [8], apresenta um estudo para a zona compreendida entre o cabo Raso (a norte) e Espichel (a sul), onde indica a refração e a difração da ondulação dominante e conclui que existe uma predominância de transporte longilitoral de Sul para Norte, acentuado ainda por ondulação proveniente de Sudoeste, frequentemente sob a forma de tempestades. Esta mesma hipótese é igualmente defendida por Taborda e Andrade (2014) [9], que apresentam o esquema do balanço sedimentar na célula litoral entre a praia do Guincho (a norte do Cabo Raso) e o Cabo Espichel, Figura 3.

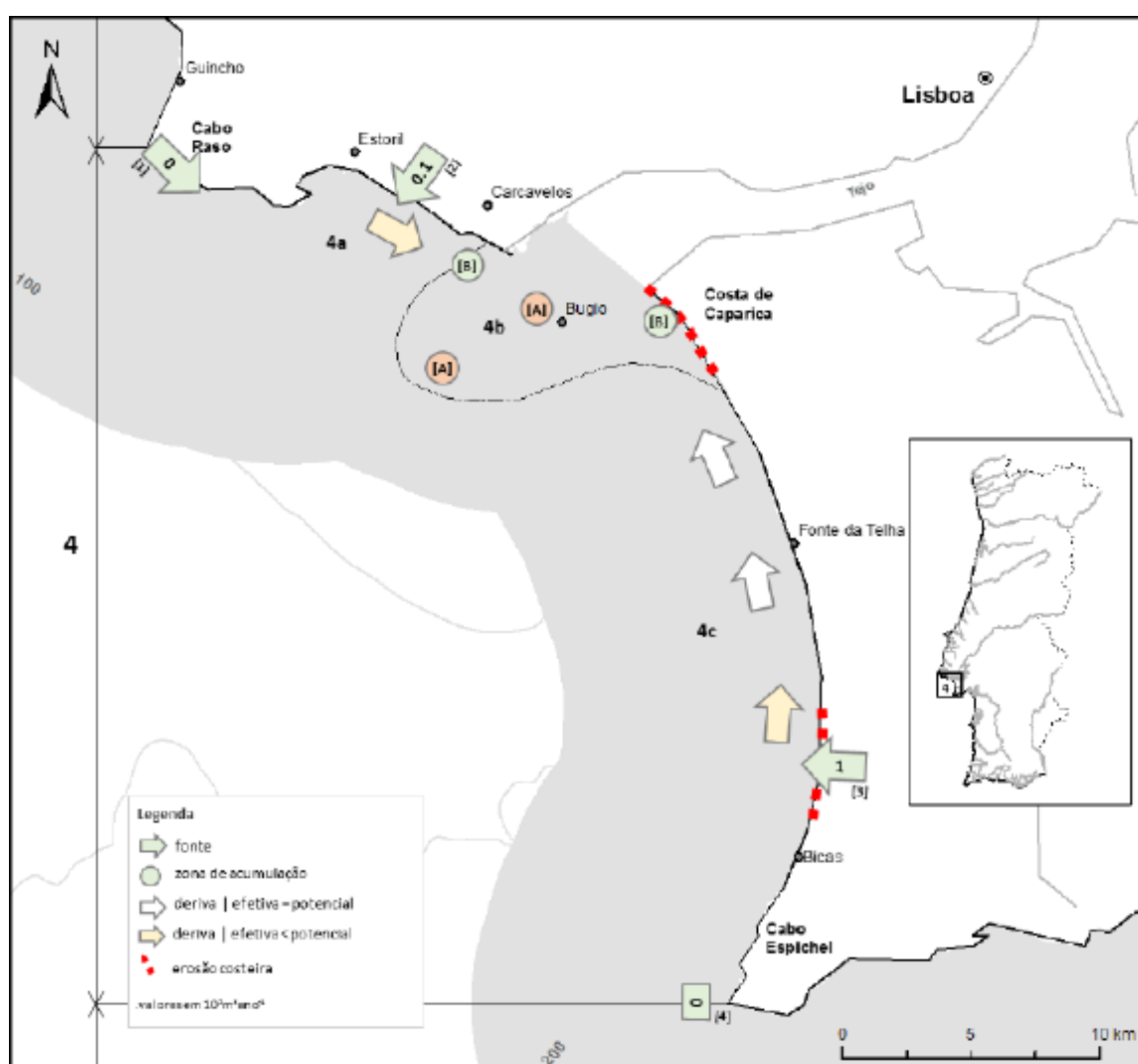


Figura 3 - Balanço sedimentar no arco litoral Oeste do arco Caparica-Espichel (retirado de Taborda e Andrade, 2014).

Em contrapartida, CEHIDRO (1999) [10] e Teixeira (1990) [11], defendem que existem um determinado ponto ao longo deste troço, onde se verifica uma mudança na direção do transporte, justificado pela variação do efeito da refração. Segundo estes autores, o transporte dominante seria de

sul para norte no trecho mais setentrional, devido à forte refração das ondas no banco aluvionar do Cachopo Sul (também designado como baixio do banco do Bugio), e para sul desse ponto (de divergência) o transporte sedimentar seria dirigido para sul, devido à menor modificação da agitação marítima pelo fenómeno da refração.

Mais recentemente, foram realizados dois estudos para todo o arco. Taborda *et al.* (2014) [12], analisou um período de 25 anos, compreendidos entre 1970 e 1995, utilizando para tal um conjunto de 6 abordagens distintas no cálculo da deriva litoral, e apesar das diferentes abordagens terem apresentado resultados pouco semelhantes, na generalidade, o autor conclui que existe uma predominância de transporte de Sul para Norte ao longo de todo o troço.

Sancho *et al.* (2017) [5], iniciou um estudo que esta mesma dissertação pretende concluir, utilizando para o efeito a mesma abordagem que será utilizada posteriormente. No entanto, este autor utiliza um conjunto de 45 pontos espaçados ao longo de todo o arco, a uma profundidade de 14m próxima da profundidade de fecho, concluindo com os seus resultados que as direções da agitação marítima médias, total e no período de verão marítimo, são sempre positivas em toda a região arenosa do arco Caparica-Espichel, e negativas na zona a sul da Praia das Bicas, onde a costa é rochosa. Os resultados para o inverno marítimo, traduzem uma direção de transporte sedimentar para sul em quase todo o trecho arenoso, com a exceção da praia de S. João da Caparica, onde a média é dirigida para norte.



## 3. Metodologia

### 3.1. Generalidades

No presente capítulo apresenta-se a metodologia utilizada nesta dissertação para determinar estimativas do transporte longilitoral no arco Caparica-Espichel. Para tal quantificou-se a agitação marítima próximo da costa e, com base nestes resultados, calculou-se o transporte longilitoral na zona em estudo.

A análise da agitação foi realizada a uma profundidade aproximada de 5m, isto é, próximo da profundidade de rebentação de ondas frequentes (com altura significativa da ordem de 2 m). Para obter a agitação a essa profundidade utilizou-se o programa de modelação da propagação da agitação SWAN (2016) [13]. A metodologia utilizada para escolher a localização dos pontos onde se obteve a agitação e os dados obtidos são aqui sucintamente apresentados.

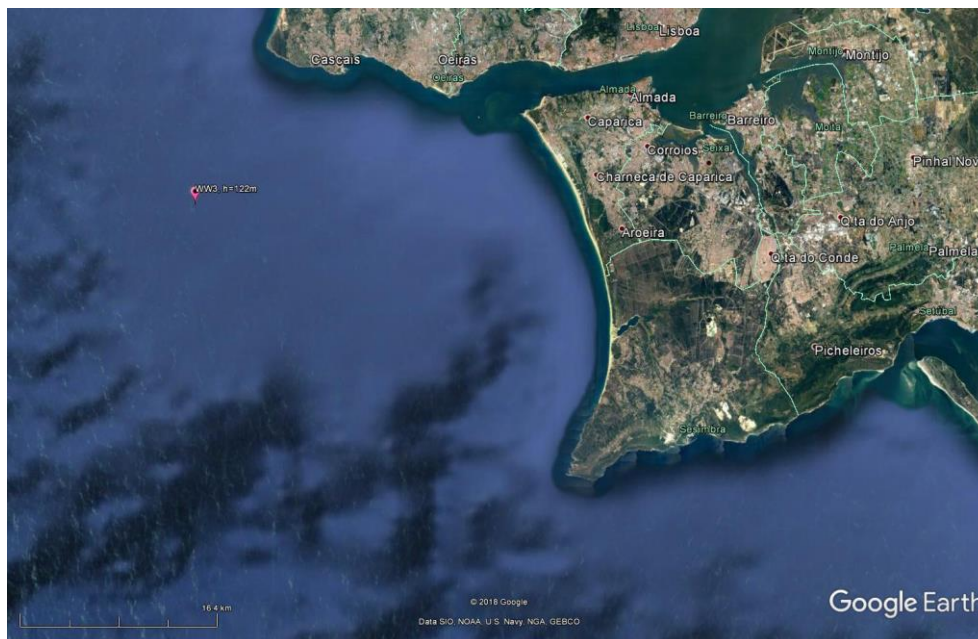
Os resultados da agitação marítima a cada seis horas durante 65 anos na profundidade de 5m foram alvo de análise da variabilidade espacial, temporal e sazonal, utilizando-se um programa desenvolvido em Matlab, que se explica sucintamente.

Como a análise do transporte longilitoral acarreta a decomposição da direção de onda nas direções perpendicular e paralela à costa, apresenta-se ainda a metodologia utilizada para obter a direção perpendicular à linha de costa e para avaliar e quantificar a agitação marítima e o transporte sedimentar na zona de estudo.

Com base nos dados de agitação foi quantificado o correspondente caudal sedimentar utilizando formulações empíricas e posteriormente analisada a sua variabilidade espacial, temporal e sazonal, utilizando-se um programa desenvolvido em Matlab, que se explica sucintamente.

### 3.2. Obtenção dos Dados à Profundidade de 5m

Para obter a agitação à profundidade de 5 m utilizou-se o programa de modelação da propagação da agitação SWAN, e propagaram-se as condições de agitação provenientes de retro-simulações (Dodet *et al.* (2010) [1] ) do modelo WW3 em águas profundas (para o ponto de coordenadas 9.55°W e 38.6°N, em frente à Costa da Caparica, à profundidade de 122 m, ver Figura 4, no período de Janeiro de 1948 a Dezembro de 2012. O modelo SWAN foi forçado com condições espacialmente uniformes nas fronteiras marítimas do domínio de cálculo, nomeadamente nas fronteiras norte, oeste e sul (não cobertas por terra), Sancho *et al.* (2018) [14].



**Figura 4 - Trecho costeiro objeto de estudo, com identificação do ponto cujos dados foram usados para propagar a agitação marítima do largo para a costa (Google Earth Pro 7.1.7.2606, acessado em 14/09/2018, ©2018 Google, imagem de 14-12-2015).**

Este período de tempo, de 65 anos, foi considerado suficientemente amplo para o cálculo da média e da variabilidade da agitação marítima local na zona de estudo. Saliente-se ainda que Sancho *et al.* (2017) [5] validaram os resultados da simulação com dados obtidos na boia-ondógrafo do Porto de Lisboa para o período de um ano (2012), obtendo desvios admissíveis, com erros quadráticos médios da ordem de 0.3 m para a altura de onda significativa, 2 s para o período de pico e  $19^\circ$  para a direção média. Apesar do erro quadrático médio da direção não ser desprezável, de acordo com aqueles autores, é relevante que o viés da direção média tenha resultado pequeno ( $-3.7^\circ$ ) tendo em atenção a discretização angular utilizada no modelo ( $10^\circ$ ), não havendo assim uma significativa variação sistemática entre valores medidos e os simulados para esta variável, fundamental para a direção do transporte sedimentar.

Para a utilização do SWAN (SWAN, 2016, versão 41.10) [13], foi preparado um modelo digital de terreno, utilizando os modelos batimétricos públicos disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico, conjugando o modelo batimétrico Liz – Cabo Espichel (com espaçamento de 250m) com o modelo batimétrico Costa da Caparica – Cabo Espichel (com espaçamento de 100m). Na Figura 5 apresenta-se a zona de estudo e o domínio de cálculo, que inclui parte da embocadura do rio Tejo e o canal submarino de Lisboa.



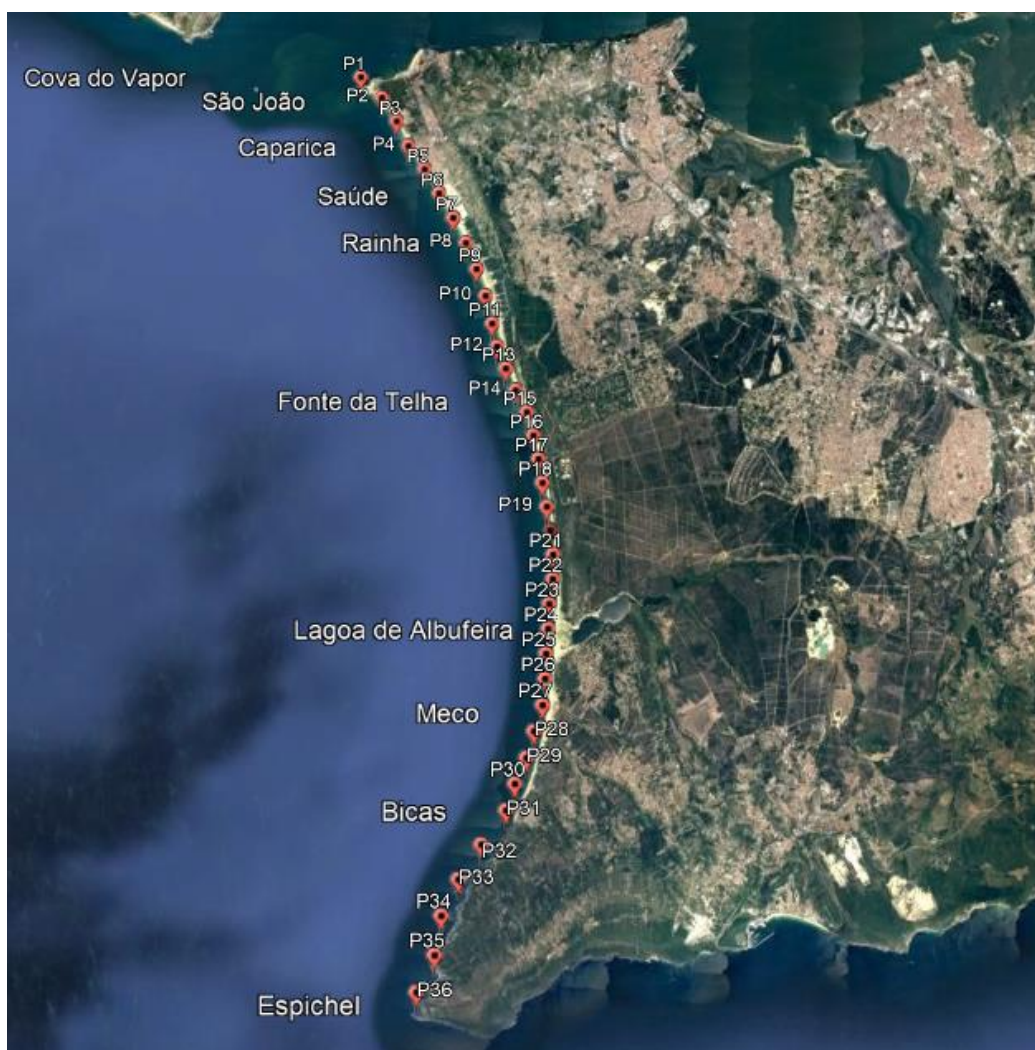
Figura 5 - Trecho costeiro objeto de estudo, com identificação do domínio de cálculo do modelo SWAN e batimetria subjacente (extraído de Sancho *et al.*, 2017).

Por motivo de cálculo computacional, as corridas do programa SWAN foram feitas subdividindo-se os dados referentes aos 65 anos num conjunto de 7 “décadas”, que correspondem a:

- **Década 1:** 1 de janeiro de 1948 a 31 de dezembro de 1959;
- **Década 2:** 1 de janeiro de 1960 a 31 de dezembro de 1969;
- **Década 3:** 1 de janeiro de 1970 a 31 de dezembro de 1979;
- **Década 4:** 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 1989;
- **Década 5:** 1 de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 1999;
- **Década 6:** 1 de janeiro de 2000 a 31 de dezembro de 2009;
- **Década 7:** 1 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2012.



Os resultados do modelo foram extraídos em 36 pontos próximos da costa, ao longo da profundidade aproximada de 5m, Figura 6.



**Figura 6 - Localização dos 36 pontos de estudo ao longo do arco Caparica-Espichel**

A Tabela 1 apresenta as profundidades exatas destes 36 pontos, para o nível médio de água (assumido como igual ao Nível Médio Adotado, em 1938 em Cascais, que é igual a 2.0 m acima do Zero Hidrográfico). A tabela A.1 apresentada em anexo, apresenta informação mais detalhada de cada ponto. É importante referir que foram excluídos da análise diversos pontos identificados a cinzento na Tabela 1, devido a um erro de especificação de coordenadas, calculadas automaticamente por interpolação pelo programa SWAN, tendo-se posteriormente verificado, após a execução do modelo,



que esses pontos estavam em terra e não à profundidade desejada. Relativamente aos pontos válidos, a profundidade real média é igual a 5,48 m, com um desvio padrão de 1,14 m.

**Tabela 1 – Pontos de estudo e respetivas batimetrias.**

Pontos	<i>Profundidade Média Global (m)</i>	Pontos	<i>Profundidade Média Global (m)</i>
1	5,09	19	-98,72
2	4,93	20	-99
3	4,88	21	5,01
4	4,86	22	5
5	4,99	23	5
6	4,91	24	-83,69
7	5	25	-99
8	4,99	26	-99
9	4,97	27	5,51
10	4,98	28	6,68
11	4,97	29	5,87
12	4,68	30	5,17
13	4,98	31	-99
14	4,94	32	9,64
15	5,45	33	9,02
16	5,28	34	5,78
17	5,29	35	-99
18	5,58	36	-99

A seleção da profundidade de 5 m resultou por ser considerada próxima da profundidade de rebentação para ondas com altura significativa da ordem de 2 m. Ou seja, idealmente, os pontos de extração de resultados deveriam ter sido obtidos à profundidade de rebentação para cada condição de agitação. No entanto, considerando que a rebentação de ondas no SWAN é modelada através de uma função de densidade de probabilidade, resultando numa variável que representa a fração de ondas rebentadas em cada ponto de cálculo, não é assim possível determinar categoricamente a profundidade à qual ocorre a rebentação para cada condição de onda. Assim, os pontos de extração das condições de agitação marítima locais são próximos daqueles aonde ocorre a rebentação, sendo, no entanto e em algumas ocorrências, localizados a barlamar da rebentação, podendo assim ainda ocorrer refração e empolamento das ondas nesse espaço físico. Para ondas oblíquas à praia, essa correção implicaria uma ligeira redução do ângulo de aproximação da onda relativo à costa na localização da rebentação.

Os resultados provenientes das simulações realizadas no SWAN constam de valores de direção média de onda (onde “média” refere-se à direção média espectral representativa de determinado estado de agitação multidirecional),  $\theta$ , altura significativa,  $H_s$ , e período de pico,  $T_p$ , obtidos de 6 em 6 horas durante o período em análise. Na presente dissertação procedeu-se à

avaliação de  $\theta$  e  $H_s$  ao longo do arco Caparica-Espichel, por serem os parâmetros de maior importância no estudo da deriva litoral, já que são variáveis intervenientes nas fórmulas de transporte que aqui se utilizam (ver subcapítulo 3.4).

### 3.3. Direção Perpendicular à Linha de Costa

A fim de analisar a influência da direção incidente da onda no sentido do transporte sedimentar, foram importadas as coordenadas dos 36 pontos de estudo (Tabela A.1) para o programa de desenho AutoCAD®, juntamente com as coordenadas dos pontos da linha de costa, Figura A.2 apresentada em anexo. Com estes últimos, foi possível definir o alinhamento da costa, i.e., definir a “linha de costa”, em toda a extensão no arco Caparica-Espichel, Figura 7.

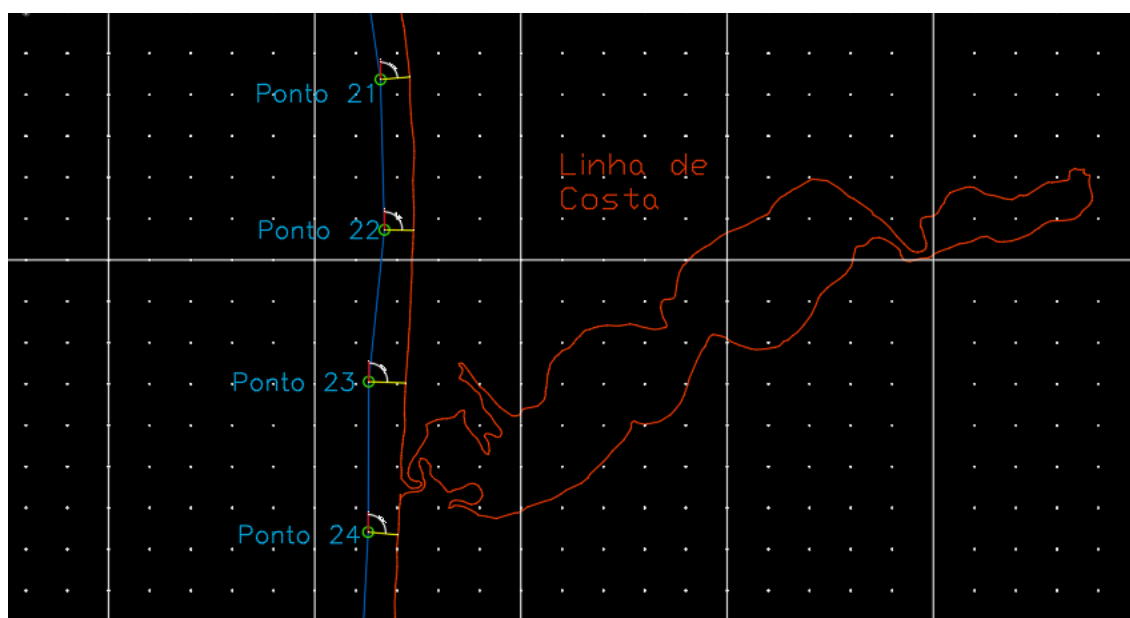


Figura 7 – Representação da linha de costa (laranja) da zona da Lagoa de Albufeira e de alguns dos pontos de estudo.

Seguidamente, foram retirados os respetivos ângulos,  $\tau$ , das linhas perpendiculares à linha de costa relativamente ao norte cartográfico, Figura 8. Com base nestes valores ( $\tau$ ) e no conjunto de direções de onda ( $\theta$ ) determinaram-se os ângulos ( $\alpha$ ) entre a direção de onda e a direção perpendicular à linha de costa em cada ponto:

$$\alpha = \theta - 180 - \tau \quad 3.1$$

com todos os ângulos em graus. A expressão 3.1 é válida no domínio  $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ , que é aquele correspondente às direções de agitação expectáveis no local de estudo. No domínio  $0^\circ < \theta < 180^\circ$  a expressão seria  $\alpha = \theta + 180 - \tau$ .



Figura 8 – Representação do ângulo ( $\tau=53,86^\circ$ ) no ponto 2, comparativamente à perpendicular à linha de costa.

### 3.4. Quantificação do Transporte Longilitoral

Para a quantificação do caudal de sedimentos com base nos dados de agitação, nesta dissertação foram utilizadas duas fórmulas empíricas: a de Kamphuis [15] e a do CERC [16].

A fórmula apresentada por Kamphuis (1981) mostrou ter resultados bastante pertinentes em Larangeiro e Oliveira (2003) [17], quando aplicada a Buarcos [17]. A expressão de CERC, para além de ser relativamente simples, é uma das expressões mais utilizadas. Esta fórmula também foi utilizada por Taborda *et al.* (2014) [12] para a estimativa do transporte litoral no mesmo trecho costeiro que o do presente estudo.

A fórmula de Kamphuis é dada por:

$$Q_l = \frac{2,27}{[(\rho_s - \rho)a']} * H_b^2 * T_p^{1,5} * i^{0,75} D_{50}^{-0,25} * \sin(2\alpha_b) \quad 3.2$$

onde  $Q_l$  representa o volume de sedimentos transportado ( $m^3/s$ ). Kamphuis [15], considera que o caudal depende dos parâmetros seguidamente descritos: densidade dos sedimentos, ( $\rho_s=2650kg/m^3$ ); densidade da água, ( $\rho=1020kg/m^3$ ); porção sólida sedimentar,  $a'$ , onde ( $a'=1-porosidade$ ); altura de onda na rebentação,  $H_b$  (m); período da agitação de pico,  $T_p$  (s); declive do leito do mar representativo

na zona de espalho da onda,  $i(^{\circ})$ ; diâmetro mediano de sedimentos ( $D_{50}$ ); e ângulo médio da agitação marítima incidente,  $\alpha_b(^{\circ})$ .

É importante referir que, tanto para a utilização da fórmula de Kamphuis, como para a de CERC, que se apresentará seguidamente, foi necessário obter as alturas significativas de onda na rebentação,  $H_b$ , e as direções de onda à profundidade de rebentação,  $\alpha_b$ . Recorde-se que, como referido na secção 3.1, os resultados do SWAN foram extraídos em pontos à profundidade de 5 m, próxima da de rebentação, mas não esta pela circunstância de limitações do próprio modelo.

Uma melhor aproximação da profundidade de rebentação foi então estimada, considerando que a relação entre a altura de onda e a profundidade na rebentação é de 0.78. Assim, numa primeira aproximação, utilizando os valores de  $H_s$  obtidos à profundidade de 5 m, determinou-se a profundidade aproximada da onda na rebentação,  $h_b = H_s/0.78$ . Uma vez determinada a profundidade na rebentação, determina-se a direção da agitação a esta profundidade, admitindo simplificadaamente que este processo ocorre em “águas de pequena profundidade” (onde a celeridade de onda é dada por  $c = \sqrt{gh}$ ). Aplicando a Lei de Snell (ou da teoria da refração de onda) resulta:

$$\text{sen}(\alpha_b) = \sqrt{\frac{h_b}{h_5}} \text{sen}(\alpha_5) \quad 3.3$$

em que o sub-índice 5 indica que a variável é determinada aos 5m de profundidade.

Por outro lado, uma vez determinado  $\alpha_b$ , procede-se ao cálculo aproximado da altura de onda na rebentação, aplicando o coeficiente de refração de onda ao valor de  $H_s$  determinado à profundidade de 5m:

$$H_b = H_s \sqrt{\frac{\cos \alpha_5}{\cos \alpha_b}} \quad 3.4$$

A obtenção destes valores a partir das condições na batimétrica +5m contabilizou apenas os efeitos de refração, desprezando, portanto, os efeitos do empolamento da onda. Tal deve-se ao facto de que o empolamento só poderia ser devidamente incorporado nos cálculos se fosse incluído iterativamente o seu efeito, com novas estimativas da profundidade da rebentação, o que se se considerou não ser necessário em virtude das aproximações anteriormente adotadas em todo o processo de estimativa (através de modelação) da agitação marítima local.

Note-se ainda que, como referido anteriormente, na expressão (3.2)  $Q_i$  depende do diâmetro mediano de sedimentos,  $D_{50}$ . Como tal, foi necessário definir o valor deste parâmetro a utilizar no cálculo. Com base em estudos anteriores (Diogo *et al.*, 2013 [18]), foi analisada a variabilidade dos valores de  $D_{50}$  desde o topo norte do Arco, na Cova do Vapor, até à extremidade sul do trecho arenoso, na Praia das Bicas. Conclui-se que, como se observa na Figura A.1 fornecida em anexo, os sedimentos apresentam valores de  $D_{50}$  compreendidos entre os 0,2 mm e os 0,7mm desde a Cova do Vapor até perto da praia das Bicas. A sul desta praia, o trecho é fundamentalmente formado por arriba rochosa,

podendo, contudo, haver pequenos depósitos sedimentares submersos, mas sem expressão para o transporte sedimentar.

Relativamente à zona compreendida entre a Cova do Vapor e a praia das Bicas, analisou-se a influência, nos caudais sólidos, da variação dos valores de  $D_{50}$ . Para tal calculou-se  $Q_l$  para valores de  $D_{50}$  mínimos (0,2mm) e máximos (1mm). Conclui-se que existe alguma variação nos resultados, já que o valor de  $Q_l$ , dado pela expressão  $(1\text{mm}/0.2\text{mm})^{0.25}=1.49$ , variará em ~50%. Apesar disso, por facilidade de cálculo e com vista a obter um resultado preliminar, utilizou-se para os cálculos efetuados neste estudo um único valor de  $D_{50}$  em todo o arco litoral, correspondente a 0,3mm, por ser o valor dominante neste troço do arco (Diogo *et al.*, 2013 [18]).

A fórmula de CERC (1984) [16], permite calcular o caudal  $Q_l$  da seguinte forma:

$$Q_l = k * \frac{\rho g^{0.5}}{16 * \sqrt{\gamma_b} * (\rho_s - \rho)(1-p)} * H_b^{2.5} * \sin(2\alpha_b) \quad 3.5$$

que depende por sua vez da aceleração gravítica,  $g$  (com  $g=9.8\text{m/s}^2$ ), da densidade da água e dos sedimentos,  $\rho$  e  $\rho_s$  respetivamente, porosidade,  $p$ , altura de onda significativa na rebentação,  $H_b$  (m), ângulo da onda incidente na rebentação,  $\alpha_b$  (°), do índice de rebentação  $\gamma_b$ , ( $\gamma_b = h_b/H_s$ , em que  $h_b$  representa a profundidade da onda na rebentação) e  $k$  (onde  $k=0.39$ ), que representa um coeficiente empírico de proporcionalidade adimensional (Mil-Homens *et al.*, 2013).

### 3.5. Análise da Variabilidade da Agitação e do Transporte Sedimentar

Para analisar a variabilidade da agitação e do transporte sedimentar ao longo do tempo de análise e ao longo da área de estudo, os valores de agitação obtidos, para cada década, à profundidade de 5 m e o do transporte sedimentar obtido com base na agitação foram posteriormente processados por um programa de cálculo matemático desenvolvido em linguagem MatLab. Este programa em MatLab calcula os valores estatísticos pretendidos, isto é, os valores médio, mínimo, máximo e o desvio padrão de  $H_s$ ,  $\theta$  e  $Q_i$ , facilitando também a organização da quantidade alargada de dados em análise.

Devido ao enorme volume de resultados, como os valores dos parâmetros da agitação foram obtidos com o SWAN década a década, para se obterem os valores estatísticos globais de toda a amostra foi necessário recalculas as médias e desvio padrão globais. Assim, para o cálculo da média global com base na das 7 décadas calculou-se, com base na média de cada década  $n$ ,  $x_n$ , e do número de dados da década  $n$ ,  $n^{\circ}\text{entradas}_n$ , a soma dos valores do parâmetro na década,  $X_n$ , dada por:

$$X_n = x_n * n^{\circ}\text{entradas}_n \quad 3.6$$

Seguidamente, procedeu-se ao cálculo efetivo da média corrigida,  $\bar{X}_C$ , dada por:

$$\bar{X}_C = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_n \quad 3.7$$

Onde  $N$ , é o número total de entradas de todas as décadas.

Procedeu-se seguidamente ao cálculo do desvio padrão corrigido,  $\sigma_C$ , para cada ponto, tendo em conta cada década  $n$ ,

$$\sigma_C = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_n^2 * n^{\circ} \text{entradas}_n)} \quad 3.8$$

Este reajuste é realizado para todos os parâmetros (direção de onda e altura significativa no capítulo 4 e caudal de sedimentos no capítulo 5).

Foram realizadas análises da variabilidade espacial, sazonal e temporal dos parâmetros de agitação marítima e do transporte sedimentar. A variabilidade temporal foi ainda analisada em 5 pontos localizados em diferentes praias, de forma a comparar os resultados obtidos ao longo do Arco com as de Taborda *et al.* (2014) [12].

Para a análise de variabilidade, utilizou-se um programa desenvolvido em Matlab que analisa os valores estatísticos anteriormente obtidos e gera dois ficheiros de resultados:

**Processed\_file:** com os resultados dos valores médios, mínimos, máximos e desvios padrão) de cada parâmetro da agitação e do caudal sedimentar, obtidos para a totalidade dos 65 anos (global), e ainda para os períodos de verão e de inverno marítimos separadamente, assim como para cada ano individualmente;

**Seasonal\_file:** contém os resultados dos mesmos valores estatísticos do process\_file, neste caso, para cada ano individualmente, mas separando a informação em 4 grupos de 3 meses cada: janeiro, fevereiro e março (JFM), abril, maio e junho (AMJ), julho, agosto e setembro (JAS) e finalmente outubro, novembro e dezembro (OND).

Estes resultados são os necessários para analisar a variabilidade da agitação e do transporte longilitoral no Arco Caparica-Espichel.

## 4. Variabilidade da Agitação Marítima

### 4.1. Generalidades

Neste capítulo apresentam-se os resultados referentes à análise da variabilidade espacial, sazonal e temporal da agitação marítima ao longo do arco Caparica-Espichel durante o período compreendido entre 1948 e 2012. Para tal são analisados os três parâmetros principais da agitação marítima, a direção de onda, a altura de onda significativa, e o período de pico, respetivamente, parâmetros base para o cálculo do transporte sedimentar.

### 4.2. Variabilidade Espacial

Para a análise da variabilidade espacial da agitação marítima, como base no conjunto de 65 anos de resultados da propagação com o modelo SWAN, em 36 pontos à profundidade de 5.0 m ao longo do arco Caparica-Espichel (ver capítulo 3), de dados de *hindcast* de agitação marítima, foram retirados os valores médios, máximos, mínimos e desvios padrão do rumo e das respetivas alturas de onda significativas e períodos de pico, de forma a obter uma visão global das características da agitação ao longo do arco Caparica-Espichel.

No que respeita à direção da agitação incidente, apresentam-se na Figura 9 os resultados da sua variação espacial ao longo dos 36 pontos em análise. É de notar que, na Figura 9, o eixo das abcissas é expresso em distâncias relativas ao Ponto 1 (localizado na Cova do Vapor) para Sul. Os pontos 19, 20, 24, 25, 26, 31, 32, 33, 35 e 36 não são apresentados no gráfico porque, tal como foi descrito no capítulo anterior, ocorreu um ligeiro desvio na especificação das coordenadas dos pontos de extração, tendo-se posteriormente verificado, após a execução do modelo, que certos pontos estavam efetivamente em terra e não à profundidade desejada, enquanto que outros apresentavam profundidades próximas dos 9 m. Esses pontos (10 no total) foram assim excluídos da análise de resultados. De qualquer forma é possível, sem estes pontos, acompanhar a evolução dos resultados ao longo do trecho costeiro, embora não de forma contínua.

É possível observar, pela Figura 9, que existe uma suave alteração da direção da onda ao longo de todo o arco litoral, sendo que a mesma vai crescendo ligeiramente desde o seu mínimo no extremo norte,  $x=0$  m (Cova do Vapor), onde apresenta uma direção média de  $230^\circ$ , até quase ao extremo sul,  $x=23123$  m (Praia das Bicas), alcançando o seu valor máximo aproximado de  $295^\circ$ , mantendo-se praticamente constante até próximo do cabo Espichel,  $x=27364$  m.

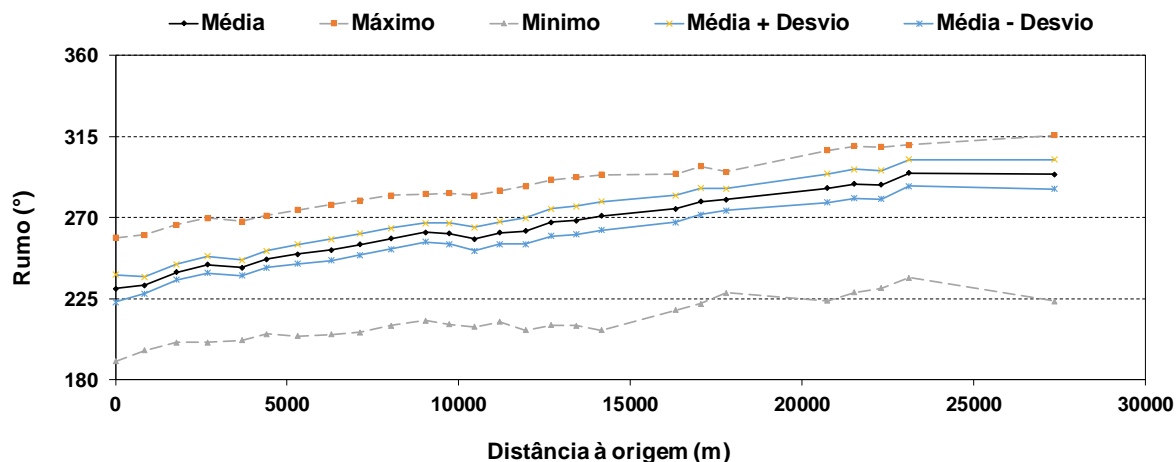


Figura 9 – Evolução do rumo ao longo do local de estudo, de norte para sul.

O desvio padrão é também menor nos primeiros 10 km, tornando-se posteriormente sensivelmente constante. As curvas de máximos e mínimos acompanham a tendência da curva da média.

Como referido no capítulo anterior, a fim de analisar uma possível influência da direção incidente da onda no comportamento de deriva litoral ao longo da zona em estudo, foram retirados dos 36 pontos, através do programa AutoCAD®, Figura 8, os ângulos das perpendiculares à linha de costa,  $\tau$ , relativamente ao norte cartográfico. Na Figura 10, é apresentada a evolução desse mesmo ângulo, suavizado através de uma média móvel de 3 pontos, ponderada com a distância ao ponto central. O gráfico tem início no ponto de coordenada  $x=0$  m, junto ao esporão sul da cova do vapor e termina próximo do cabo Espichel. Note-se que existe uma pequena alteração da direção perpendicular à linha de costa entre os pontos 15 e 16,  $x \sim 12$  Km (Fonte da Telha), devido à protuberância ou saliente aí existente (sensivelmente a Oeste da localização da Aroeira, identificada na Figura 11).

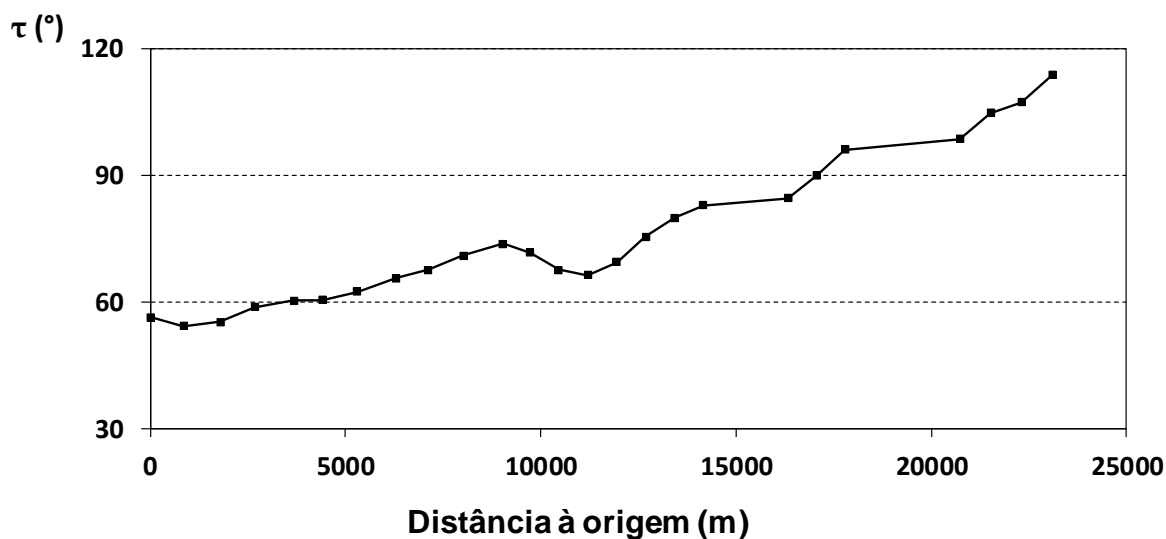


Figura 10 – Evolução do ângulo da direção perpendicular à linha de costa,  $\tau$ , com o Norte, ao longo do local de estudo, de norte para sul (correspondendo no gráfico da esquerda para a direita).



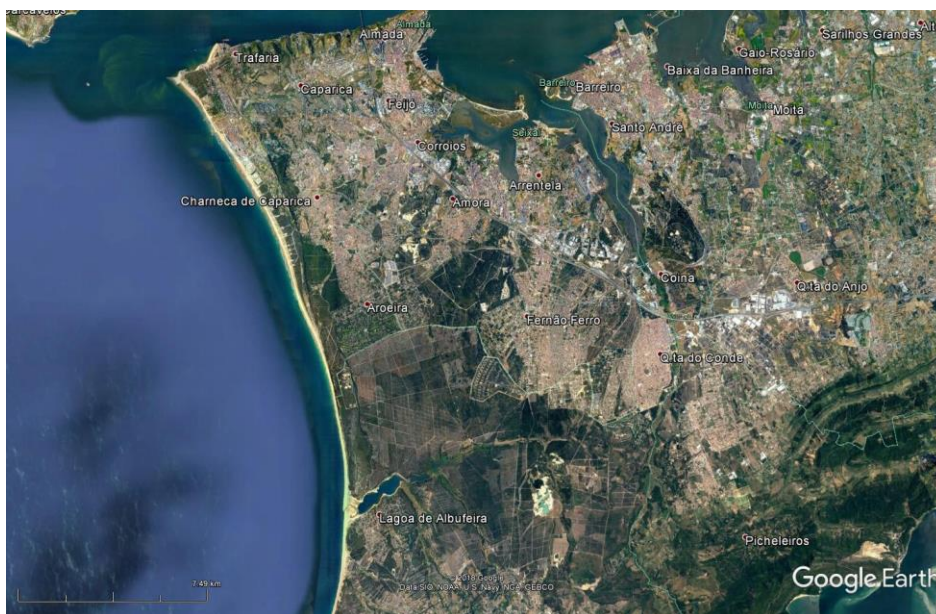


Figura 11 – Pormenor do saliente existente no arco litoral Caparica-Cabo Espichel (Google Earth Pro 7.1.7.2606, acedido em 14/09/2018, ©2018 Google, imagem de 14-12-2015).

Com os rumos médios obtidos pelas simulações,  $\theta$ , e a perpendicular à linha de costa,  $\tau$ , calculou-se a direção média da agitação marítima relativamente à perpendicular à linha de costa,  $\alpha$ , através da expressão 3.1.

Na Figura 12 apresenta-se a variação de  $\alpha$  ao longo do arco Caparica-Espichel, permitindo então observar-se uma possível tendência de transporte sedimentar, devido à dependência das funções do transporte sedimentar deste ângulo, através do fator  $\sin(2\alpha)$ . De acordo com a expressão 3.1, para ondas com  $\alpha > 0$  a direção da agitação, relativa à perpendicular, é dirigida para sul e para  $\alpha < 0$  é dirigido para norte.

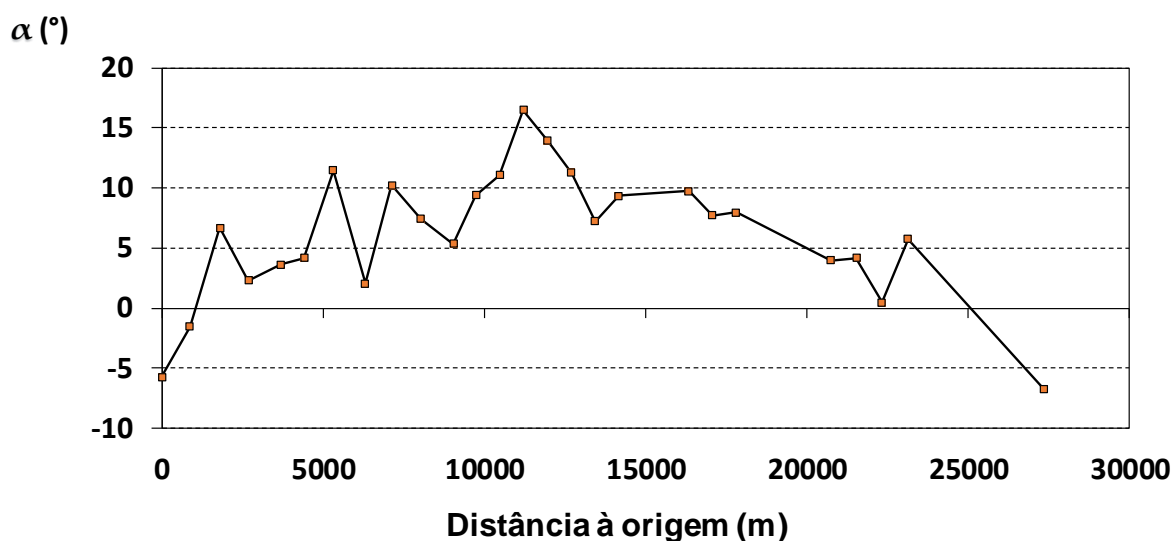


Figura 12 - Evolução da direção média da agitação marítima relativamente à perpendicular à linha de costa, ao longo do local de estudo: média total.

Verifica-se, portanto, uma direção média da agitação que poderá induzir transporte para Norte nos primeiros dois pontos do início do arco, isto é, da Cova do Vapor até à praia de São João, e no final do trecho, zona compreendida entre as praias do Meco e o cabo Espichel, onde na realidade não ocorrerá grande transporte sedimentar, devido à natureza maioritariamente rochosa dos fundos nessa zona. Na restante zona, entre  $1000 < x < 20000$  m, esta direção da agitação induziria um transporte para Sul.

Através destes resultados seria expectável uma maior tendência de transporte sedimentar direcionado de Norte para Sul em praticamente todo o arco, com exceção dos primeiros 1000 m (ao longo da praia de S. João) e do últimos 2000 m. No longo trecho intermédio, a direção média varia entre  $0^\circ$  e  $+10^\circ$ .

No que respeita à altura de onda significativa, os resultados da variação espacial ao longo dos pontos em análise desta variável são apresentados na Figura 13. Os valores estatísticos da altura significativa (média, mínimo e máximo) apresentam um ligeiro crescimento ao longo do trecho, verificando-se uma vez mais um decréscimo próximo da zona da Fonte da Telha ( $x \sim 11$  Km). Nos primeiros 10 km observa-se que  $H_s$  é sensivelmente constante e próximo de 1.0 m. O menor valor médio da altura de onda significativa, de 0.70m, ocorre na zona da Fonte da Telha ( $x=10464$ m) e o máximo, de 1.51m, próximo do extremo do cabo Espichel ( $x=27364$  m). Os valores máximos registados nos 26 pontos apresentam, no entanto, um crescimento para sul, de 3.0m na Trafaria, até 5,25 m na zona do Meco ( $x=21530$ m), onde se dá uma súbita descida dos valores.

Note-se que a ocorrência de um mínimo local em frente e a sul da Fonte da Telha é contrário ao senso comum do conhecimento da agitação marítima neste arco litoral, que levaria a pensar num crescimento uniforme da agitação de Norte para Sul. No entanto, afigura-se plausível que este mínimo ocorra devido à acentuada refração de ondas na zona do Cachopo Sul (banco de areia existente entre o Bugio e a Cova do Vapor), que pela sua batimetria (Figura 5), levaria a uma maior concentração de energia no extremo Norte e a consequente dispersão de energia na zona intermédia do trecho, coincidente também com a localização do início do canhão submarino de Lisboa.

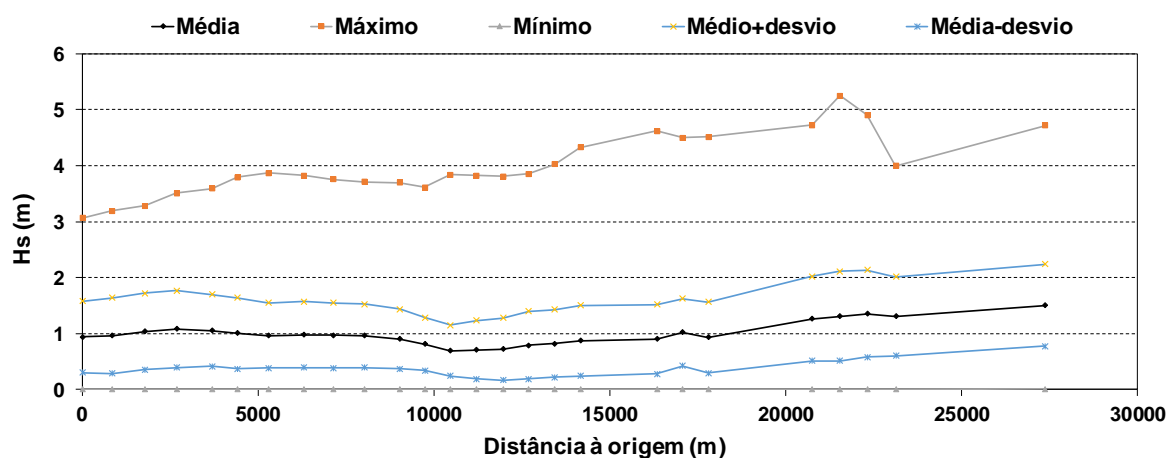


Figura 13 – Evolução da altura significativa ao longo do local de estudo, de norte para sul.

Quanto ao período de pico, verifica-se, pela Figura 14, que a sua variabilidade espacial é pequena, com variações máximas inferiores a meio segundo ao longo de todo o arco.

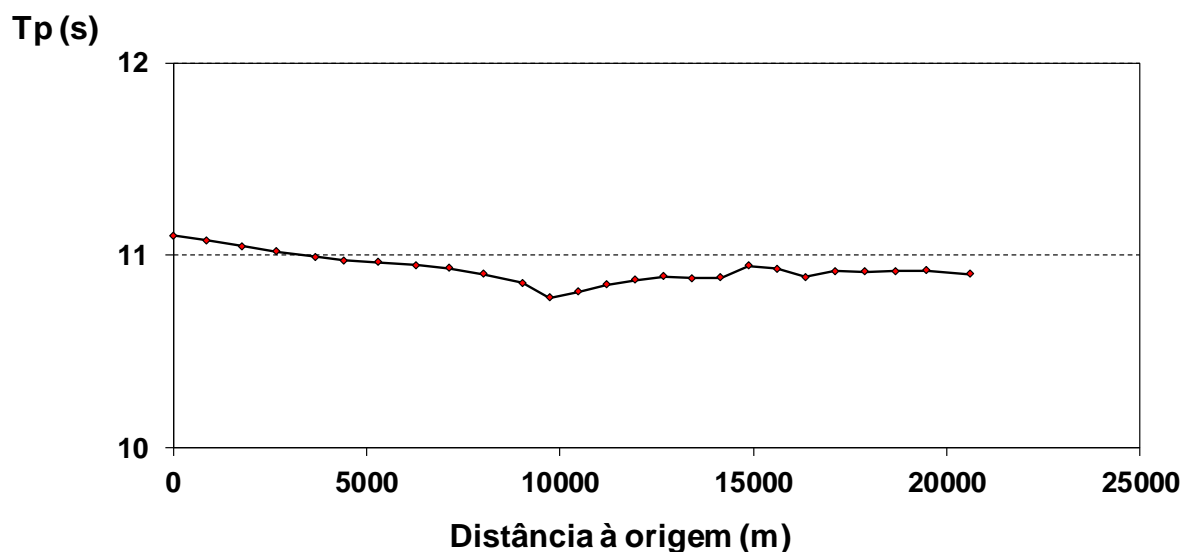


Figura 14 – Evolução do período de pico médio ao longo do local de estudo, de norte para sul.

### 4.3. Variação Sazonal

Para a análise da variabilidade sazonal da agitação marítima, foi realizada uma análise de  $H_s$ ,  $T_m$  e do rumo da agitação marítima semelhante à anterior, mas separando os resultados nos períodos de Verão e Inverno marítimos. Considera-se como Verão marítimo o período compreendido entre os meses de abril e setembro sendo que de outubro a março corresponde ao período de Inverno marítimo.

Os resultados, apresentados na Figura 15, descrevem o valor do ângulo  $\alpha$  ao longo da costa nos dois períodos em análise, juntamente com os resultados globais apresentados anteriormente. Nesta figura optou-se por limitar o eixo das abcissas somente aos pontos do trecho arenoso ( $x < 23$  km).

Verifica-se que no Verão os valores são ligeiramente superiores aos valores anuais, enquanto que no Inverno acontece o oposto. Significa isso que no inverno aumenta ligeiramente a extensão das zonas (nos extremos do trecho) onde ocorre um valor de  $\alpha$  negativo, o que poderia indicar um transporte negativo e dirigido para norte, e o valor médio de  $\alpha$  é reduzido sensivelmente de  $3^\circ$ . Ou seja, no inverno marítimo, em que a agitação marítima é mais intensa continuam a ocorrer valores de  $\alpha$  positivos, que poderiam indicar um transporte sedimentar maioritariamente dirigido para sul, apesar de com menor abrangência espacial que a sugerida pelos valores médios para o período global. Por outro lado, no verão marítimo, a tendência é de a direção de onda potenciar o transporte dirigido para sul ( $\alpha$  positivo em quase todo o trecho arenoso). Estes resultados corroboram genericamente os apresentados por Sancho *et al.* (2017) [5], obtidos à profundidade de 14 m.

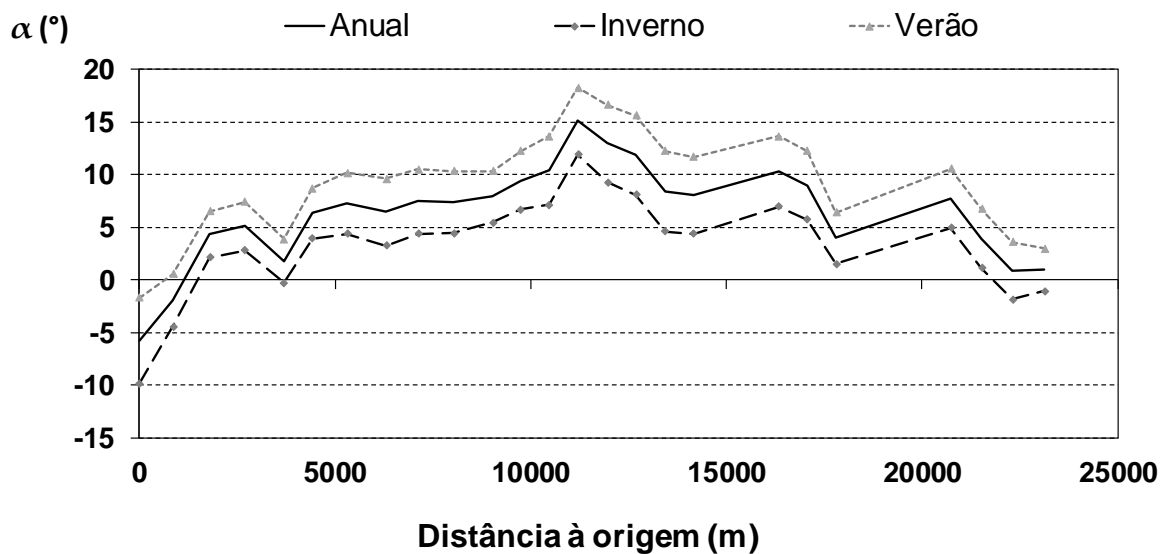


Figura 15 – Evolução da direção da onda relativamente à perpendicular à linha de costa, ao longo do local de estudo: média total, no período de inverno e no período de verão.

No que respeita à altura de onda significativa,  $H_s$ , como seria de esperar, registam-se valores superiores no Inverno, altura em que a agitação marítima atinge também o seu pico de intensidade, tal como concluído por Ferreira (1999) [7], verificando-se uma maior intensidade de agitação marítima em frente ao cabo Espichel, enquanto que no verão acontece exatamente o oposto. No inverno,  $H_s$  médio é sensivelmente 30 cm superior à média do período total e ~60 cm mais elevada que o valor correspondente no período de verão.

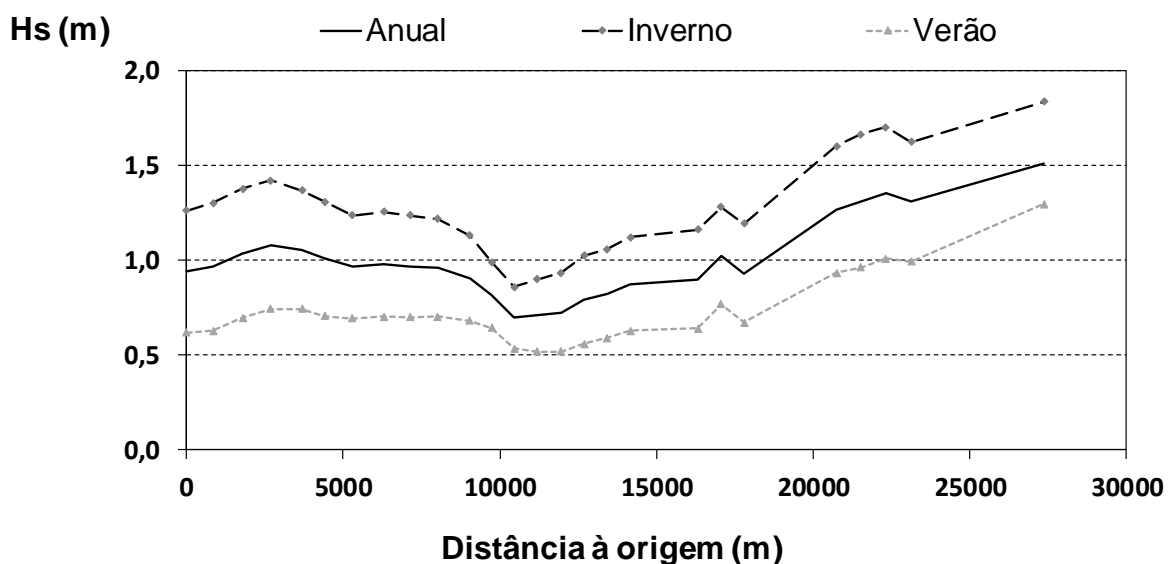


Figura 16 – Evolução da altura significativa de onda ao longo do local de estudo: média total, no período de inverno e no período de verão.

Note-se que, numa primeira aproximação, conjugando os resultados médios da direção de onda com os da altura significativa, a menor altura de onda que ocorre entre  $9000 < x < 17000$  m é “compensada” por um valor superior da direção de aproximação da onda, contribuindo para, de certa forma, equilibrar os valores do transporte sedimentar longilitoral que possam ocorrer nessa zona com os valores adjacentes.

De forma a analisar em maior detalhe a variabilidade sazonal, dividiu-se a informação em quatro grupos de três meses cada:

- Janeiro, fevereiro e março (JFM);
- Abril, maio e junho (AMJ);
- Julho, agosto e setembro (JAS);
- Outubro, novembro e dezembro (OND).

A variação dos valores médios da direção da agitação e das alturas significativas em cada um dos grupos é apresentada na Figura 17 e Figura 18, respetivamente. Quer o rumo quer o  $H_s$  aparentam ter comportamentos bastante semelhantes entre os grupos de estudo. As curvas referentes aos meses de JFM e OND apresentam os valores mínimos de rumo, Figura 17, e os maiores valores de altura significativa de onda, Figura 18, o que confirma a avaliação realizada relativamente ao período de Inverno marítimo (Outono e Inverno). O inverso acontece exatamente nos meses de Verão marítimo (Primavera e Verão), para os meses AMJ e JAS, onde se registam os maiores valores de rumo médio e os menores de  $H_s$ .

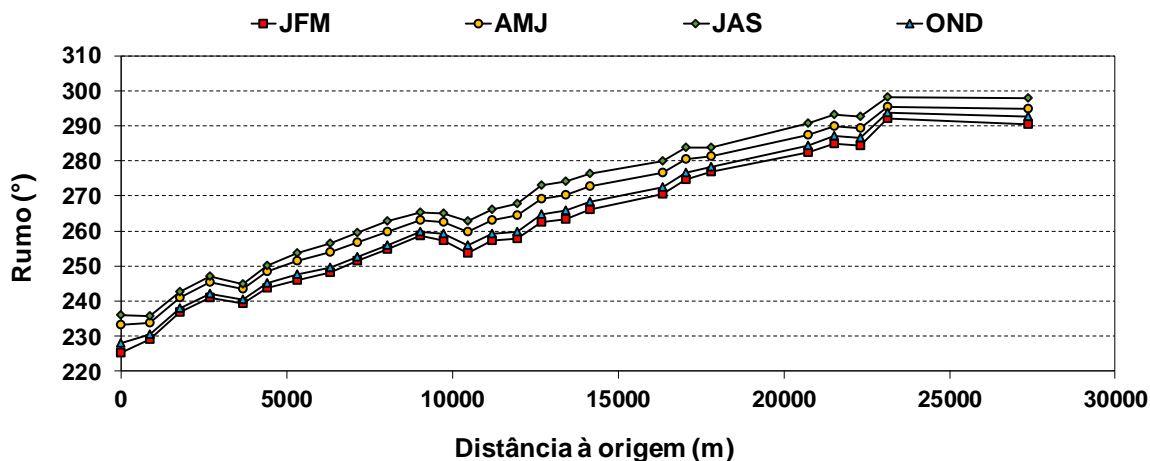


Figura 17 - Evolução do rumo ao longo do local de estudo, para cada grupo trimestral, de norte para sul.

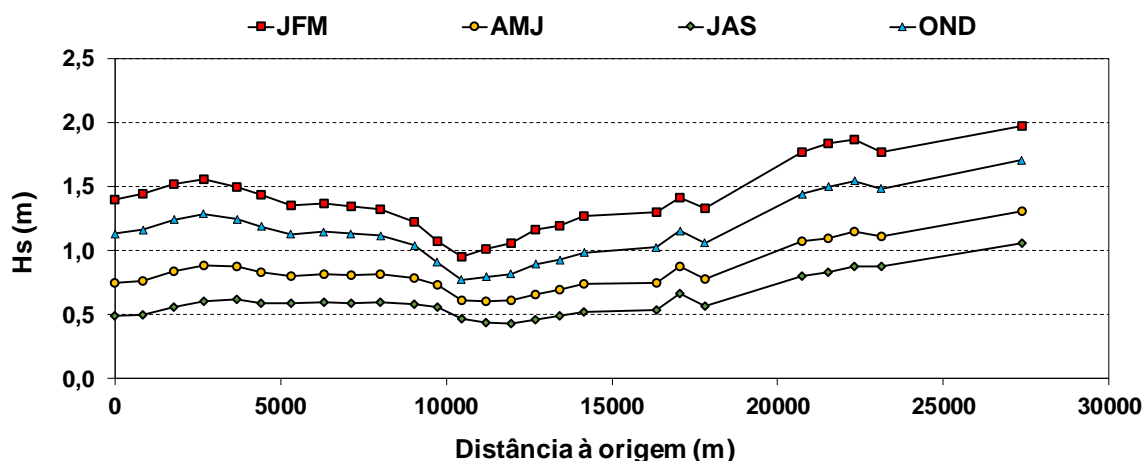


Figura 18 - Evolução da altura de onda significativa ao longo do local de estudo, para cada grupo trimestral, de norte para sul.

A evolução do ângulo da agitação marítima em relação à perpendicular à costa em cada um destes períodos, Figura 19, mostra que este é menor no inverno (JFM), aumentando ao longo do ano em todo o arco até aos meses de verão (JAS), a partir dos quais, no Outono (OND) os valores descem apresentando valores que se situam perto dos de inverno.

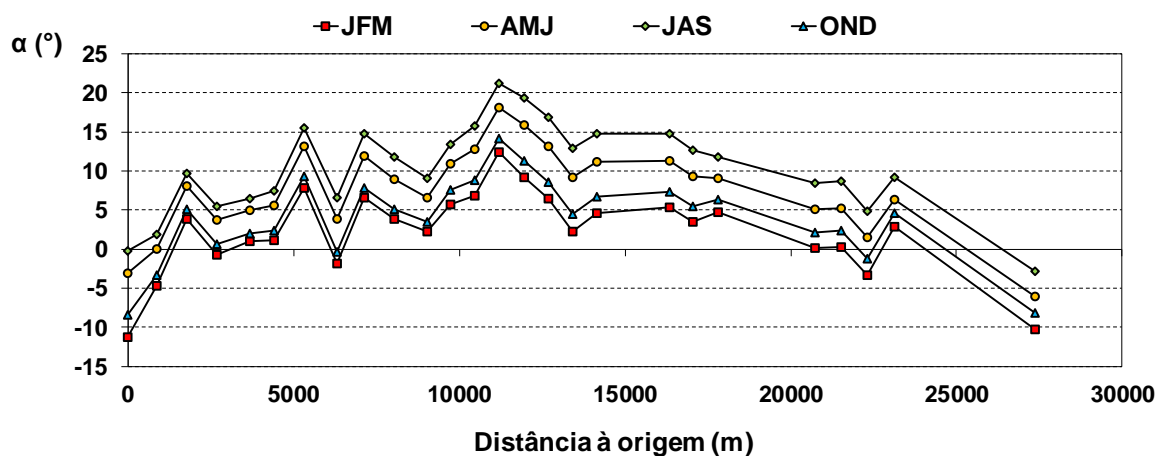


Figura 19 - Evolução da direção da onda relativamente à perpendicular à linha de costa, ao longo do local de estudo: Janeiro-Fevereiro-Março (JFM); Abril-Maio-Junho (AMJ); Julho-Agosto-Setembro (JAS); Outubro- Novembro-Dezembro (OND).

#### 4.4. Variação Temporal

Para a análise da variabilidade temporal da agitação marítima, foi realizada uma análise da evolução dos parâmetros de agitação marítima em estudo ao longo dos 65 anos da simulação. Para tal, selecionaram-se 5 pontos, Figura 20, que se descrevem seguidamente. Estes pontos foram também analisados anteriormente em outros estudos [12] no que se refere ao transporte de sedimentos em

parte do arco, pelo que, no âmbito desta dissertação, serão ainda comparados com os resultados da presente dissertação, no período temporal homólogo.

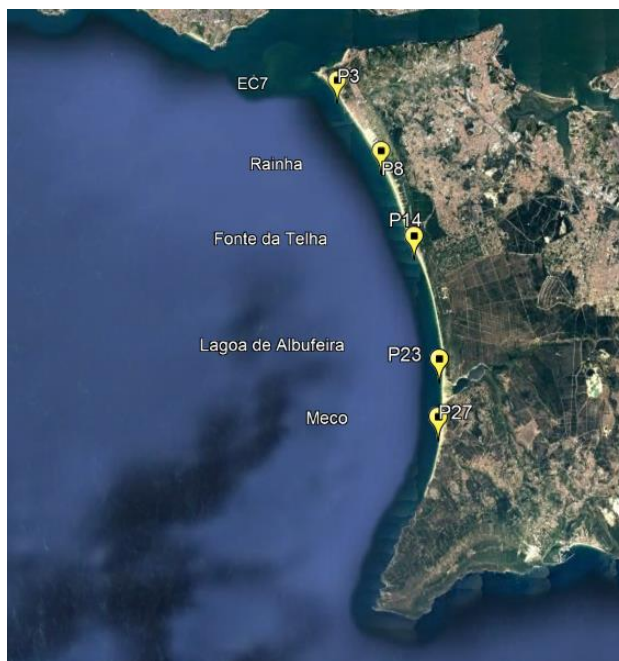


Figura 20 - Pontos de estudo ao longo do arco, ordenados de Norte para Sul.

Os pontos em análise, correspondem a:

- **Ponto A** – Esporão da Costa de Caparica, EC7 (Ponto 3,  $x=1789m$ );
- **Ponto B** – Praia da Rainha (Ponto 8,  $x=6299m$ );
- **Ponto C** – Fonte da Telha (Ponto 14,  $x=11202m$ );
- **Ponto D** – Lagoa de Albufeira (Ponto 23,  $x=17797m$ );
- **Ponto E** – Meco (Ponto 27,  $x=20741m$ ).

Para cada um desses pontos, analisou-se a evolução dos valores médios de  $\alpha$  e  $H_s$ , para cada trimestre, ao longo dos 65 anos. O conjunto de 10 figuras que se segue (da Figura 21 à Figura 30), apresenta os resultados obtidos.

Da análise destas figuras, confirma-se que continua a existir uma predominância do rumo para Sul ( $\alpha > 0$ ), com exceção dos pontos B (Figura 22) e E (Figura 25), que apresentam alguns valores de rumo direcionado para Norte nos meses correspondentes ao Inverno marítimo, confirmando os resultados apresentados anteriormente.

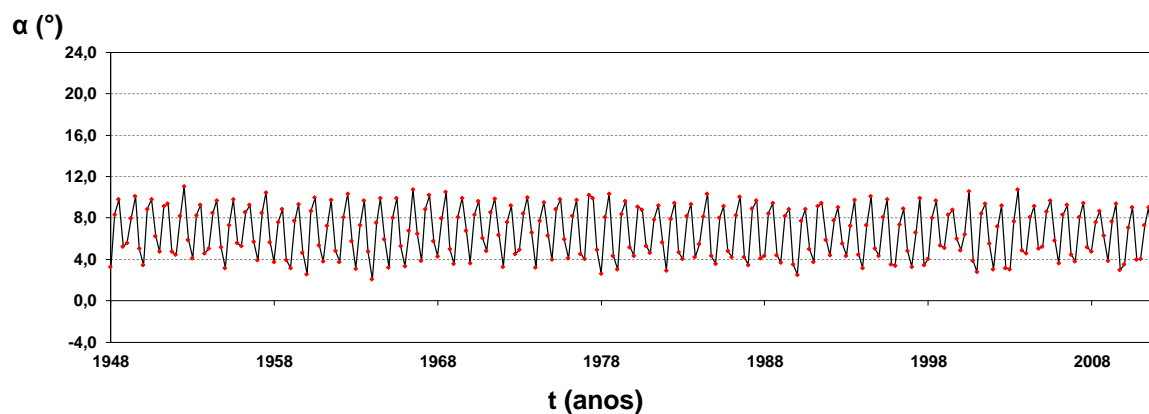


Figura 21 - Evolução da direção média por trimestre da agitação relativamente à perpendicular à linha de costa, no ponto A (EC7).

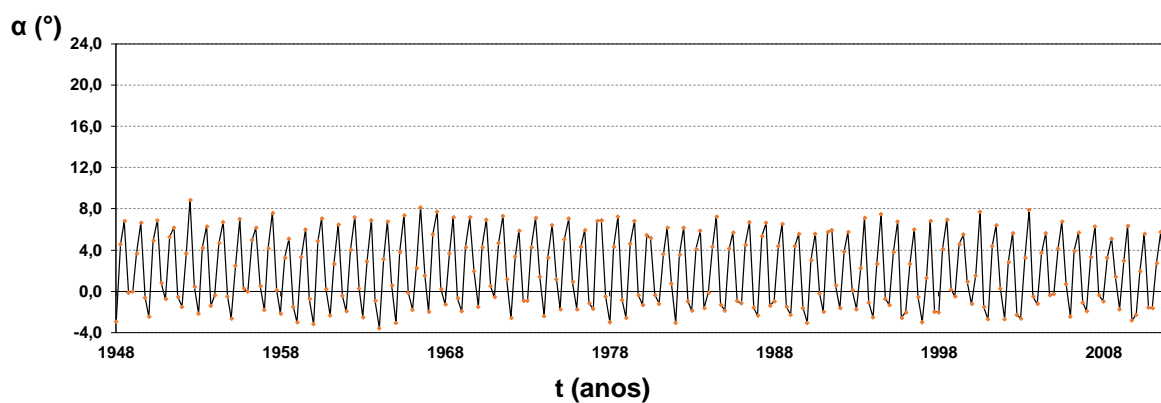


Figura 22 - Evolução da direção média por trimestre da agitação relativamente à perpendicular à linha de costa, no ponto B (Praia da Rainha).

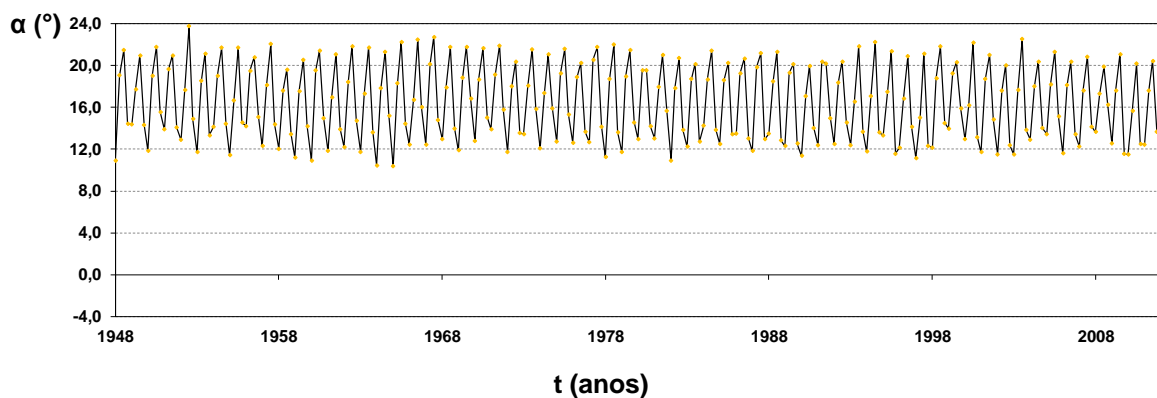


Figura 23 - Evolução da direção média por trimestre da agitação relativamente à perpendicular à linha de costa, no ponto C (Fonte da Telha).



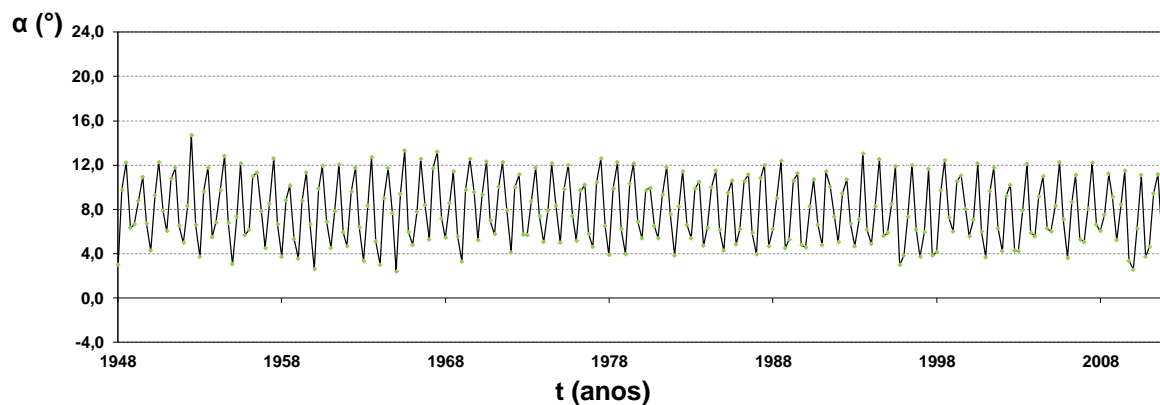


Figura 24 - Evolução da direção média por trimestre da agitação relativamente à perpendicular à linha de costa, no ponto D (Lagoa de Albufeira).

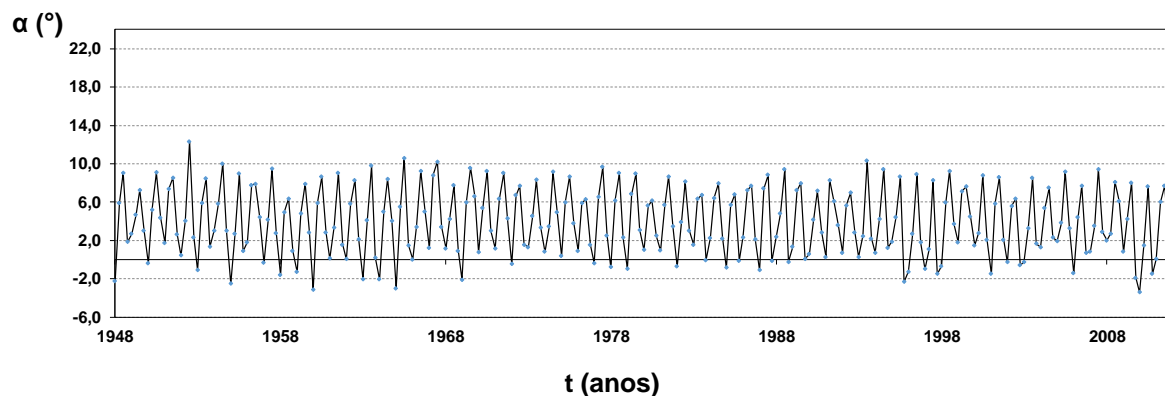


Figura 25 - Evolução da direção média por trimestre da agitação relativamente à perpendicular à linha de costa, no ponto E (Meco).

Também não existem grandes alterações a apontar no que toca aos valores de altura de onda média trimestral ao longo dos anos nos pontos em análise, Figura 26 à Figura 30, já que não se verifica grande variação de valores entre os vários pontos. Uma vez mais, confirma-se que as maiores alturas de onda média no trimestre ocorrem nos meses de janeiro, fevereiro e março, período de Inverno.

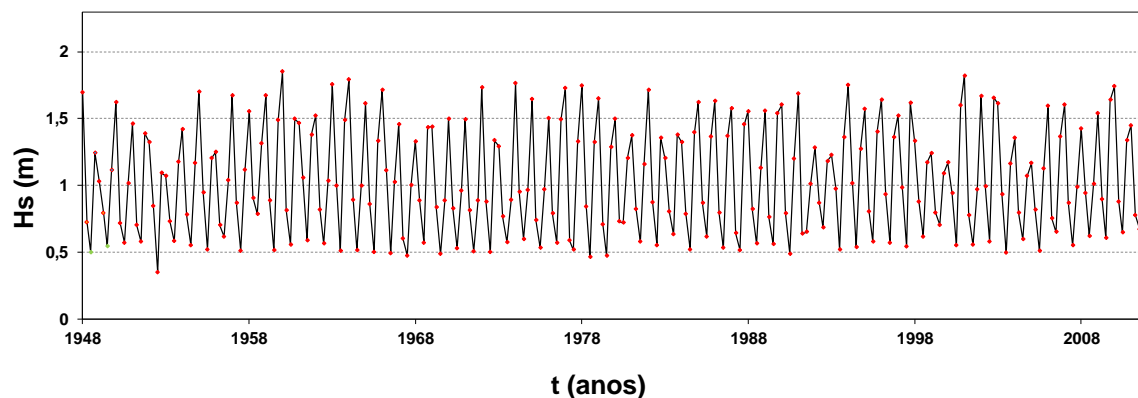


Figura 26 - Evolução da altura significativa de onda média por trimestre, no ponto A (EC7).

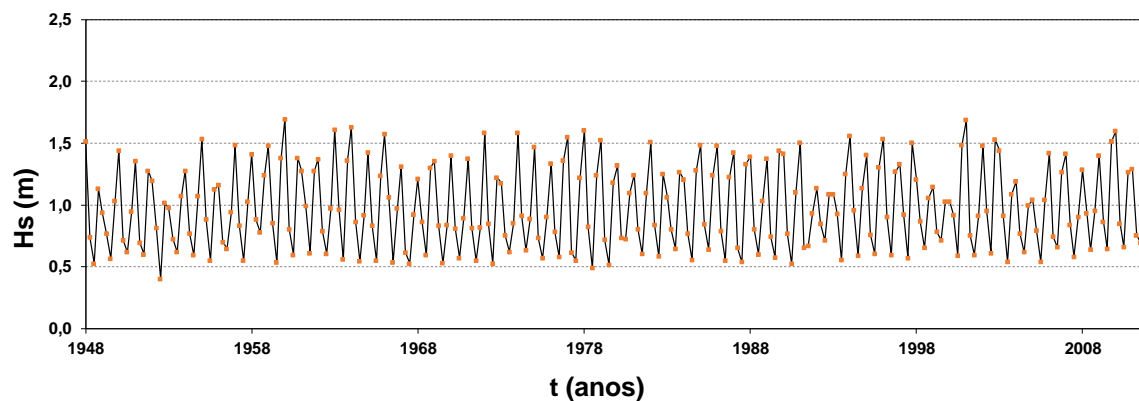


Figura 27 - Evolução da altura significativa de onda média por trimestre, no ponto B (Praia da Rainha).

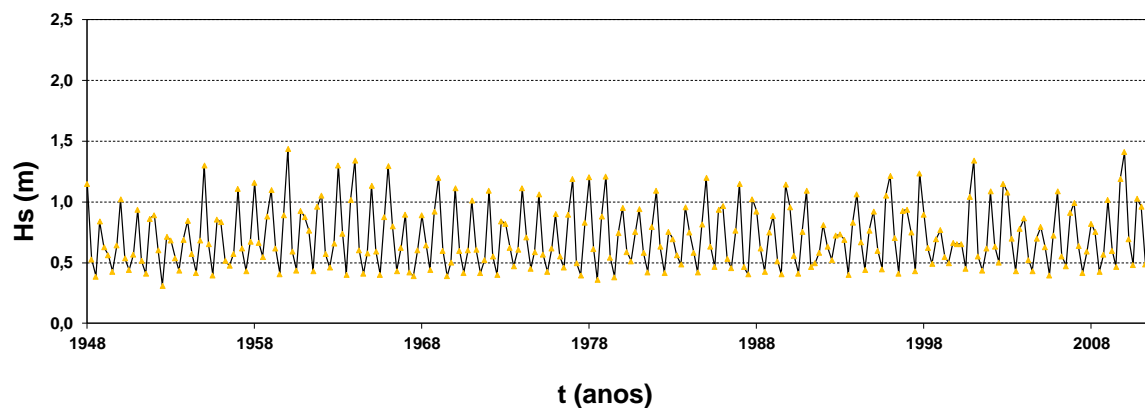


Figura 28 - Evolução da altura significativa de onda média por trimestre, no ponto C (Fonte da Telha).

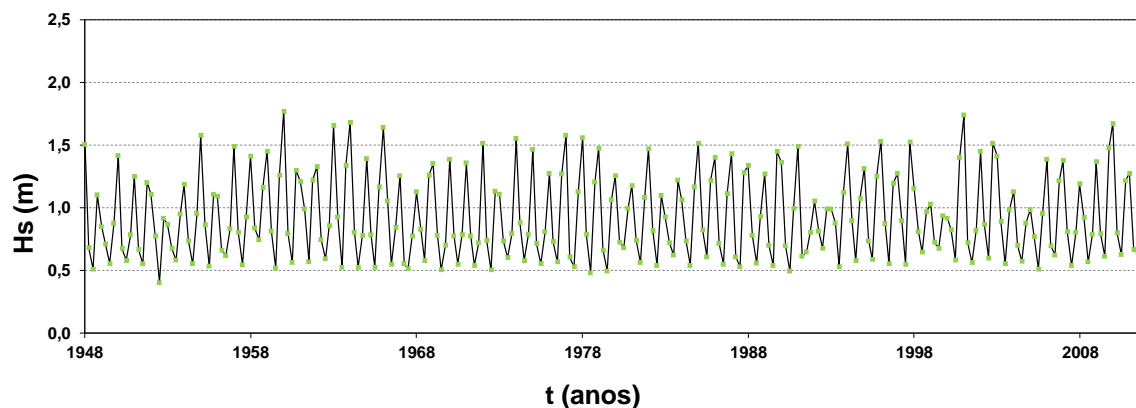


Figura 29 - Evolução da altura significativa de onda média por trimestre, no ponto D (Lagoa de Albufeira).

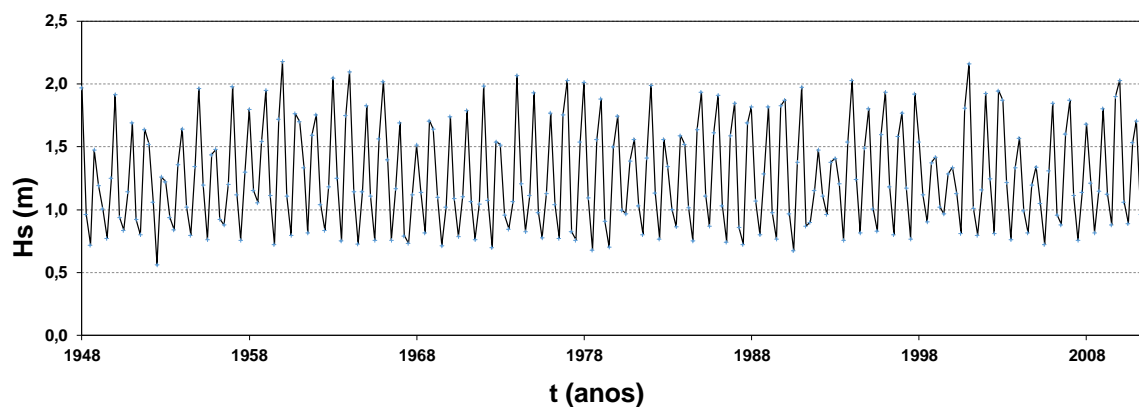


Figura 30 - Evolução da altura significativa de onda média por trimestre, no ponto E (Meco).

## 5. Transporte Longilitoral de Sedimentos

### 5.1. Generalidades

Apresentam-se, neste capítulo, os caudais potenciais longilitorais de sedimentos, calculados para os 65 anos em análise ao longo do Arco Caparica-Espichel, e analisa-se a sua variabilidade temporal e espacial. Como referido no capítulo 3, foram utilizadas duas formulações empíricas para o cálculo: CERC [16] e Kamphuis [15]. Os resultados são ainda comparados com os obtidos em estudos anteriores por Taborda e Andrade (2014) [12].

É importante referir que esta análise foi somente executada no trecho de praias arenosas, isto é, desde a Cova do Vapor ( $x=0\text{m}$ ) até à Praia do Meco ( $x=19491\text{m}$ , ponto 30).

### 5.2. Variabilidade Espacial

Para a análise da variabilidade espacial do transporte potencial sedimentar longilitoral, calcularam-se em cada uma das 26 localizações distribuídas ao longo do referido trecho arenoso os respetivos valores médio, máximo, mínimo e desvio padrão da respetiva série temporal.

Os resultados obtidos para as fórmulas de CERC [16] e de Kamphuis [15], são apresentados na Figura 31 e Figura 32, respetivamente. Nesta figura, os resultados do caudal sólido  $Q$  apresentam-se em  $\text{m}^3/\text{ano}$ , unidade esta a mais comum na descrição desta variável; no eixo das abcissas, tal como anteriormente, apresentam-se as distâncias (para Sul) do ponto origem, na Cova do Vapor, a cada ponto de cálculo. Observa-se que com CERC [16] obtiveram-se, em geral, valores de caudal inferiores aos obtidos com a fórmula de Kamphuis [15], sendo que apenas se verificam valores superiores na zona da praia da Rainha ( $x=5305\text{ m}$  até  $x=7126\text{ m}$ ) e do Meco ( $x=17109\text{ m}$  até  $x=18683\text{ m}$ ). Isto pode dever-se à influência, no caudal, de parâmetros que entram na fórmula de Kamphuis [15] mas não na de CERC [16], tais como o período de pico, o declive da praia e o diâmetro médio dos sedimentos.

Note-se que, tanto uma abordagem quanto outra, apresentam também um valor máximo no ponto de ordenada  $x=19491\text{ m}$ , localizado no último ponto estudado neste capítulo (Ponto 30). Sendo que através da fórmula de CERC se obteve um valor aproximado de  $+7 \times 10^6\text{ m}^3/\text{ano}$ , face ao valor de  $+15 \times 10^6\text{ m}^3/\text{ano}$  obtido pela formulação de Kamphuis [15], traduzindo assim uma diferença de quase 50% entre as duas abordagens.

Observe-se ainda a grande diferença na linha que traduz os valores mínimos obtidos pelas simulações ao longo dos 65 anos. Uma vez mais, apresenta-se uma elevada discrepância entre os

valores na zona das praias do Meco e as restantes áreas. Neste caso, obteve-se o caudal mínimo de  $-3,4 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/ano através da expressão de CERC (Ponto 28) e  $-4,0 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/ano para Kamphuis (Ponto 29).

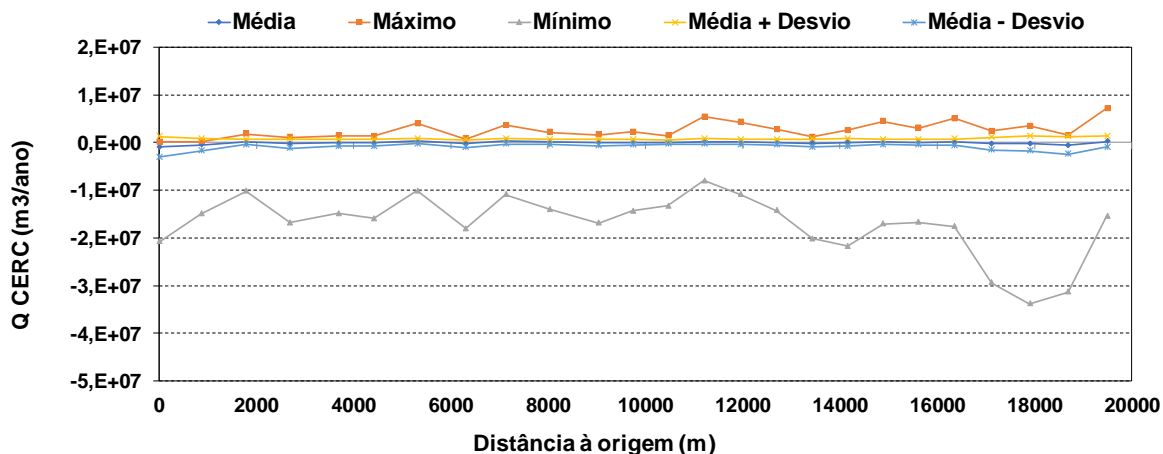


Figura 31 - Evolução do caudal calculado pela fórmula de CERC, ao longo do Arco Caparica-Espichel, de norte para sul.

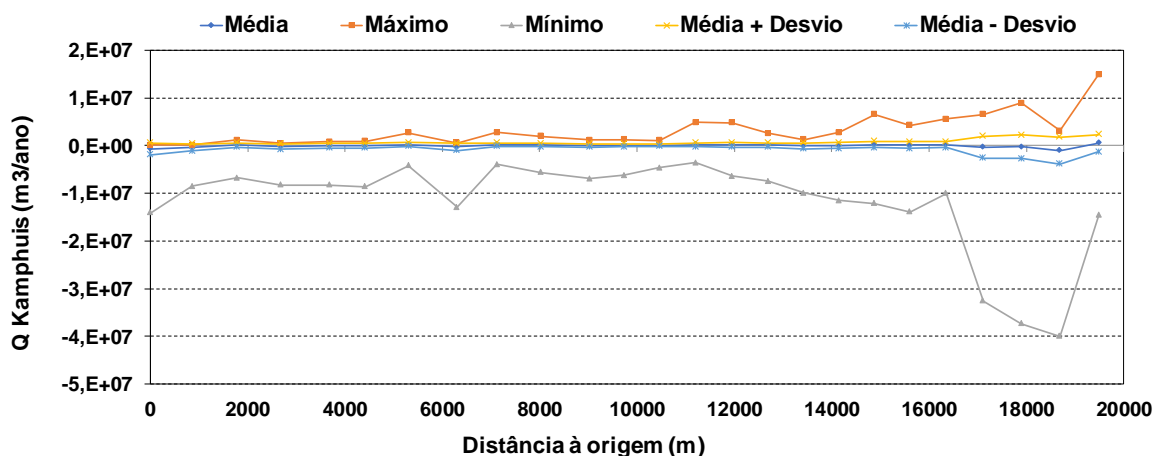


Figura 32 - Evolução do caudal calculado pela fórmula de Kamphuis, ao longo do Arco Caparica-Espichel, de norte para sul.

Analisando em maior pormenor os resultados para caudais compreendidos entre  $-1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano e  $+1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, Figura 33 e Figura 34, observa-se que existe uma grande flutuação dos resultados do valor médio ao longo do arco litoral em torno do zero, sensivelmente entre  $-6 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano e  $+3 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano para as duas formulações (excetuando os resultados dos pontos mais a sul, obtidos para a fórmula de Kamphuis [15]). A referida oscilação em torno do caudal nulo, por um lado, dificulta a interpretação de resultados, mas por outro ilustra a sensibilidade dos cálculos do transporte longilitoral a pequenas diferenças na orientação da linha de costa e da agitação marítima local incidente.

No entanto, analisando a linha de tendência polinomial, de ajuste aos valores médios, por forma a analisar a evolução espacial do caudal nos vários pontos, nota-se que (Figura 33 e Figura 34), de um modo geral, a tendência é semelhante para as duas formulações utilizadas, identificando-se três zonas principais, com dois pontos de inversão de sentido. A Figura 35 permite identificar aproximadamente a localização geográfica destas mesmas zonas. A zona mais a Norte (zona A), compreendida entre o início do referencial até ao ponto de ordenada  $x = 5305$  m (entre os pontos 1 e 7), traduzem valores negativos de caudal, ou seja, nesta zona, existe uma maior tendência de transporte dirigido de Sul para Norte. O mesmo se verifica na terceira zona (zona C), no extremo Sul do trecho arenoso, entre os pontos  $x = 16349$  m (Ponto 23) e  $x = 19491$  m (Ponto 30). Já na zona compreendida entre os pontos  $x = 6299$  m (Ponto 8) e  $x = 16349$  m (Ponto 23), a deriva litoral média é direcionada para Sul. Estes valores estão de acordo com as tendências verificadas no capítulo anterior, aquando da análise da direção da agitação marítima perpendicular à costa.

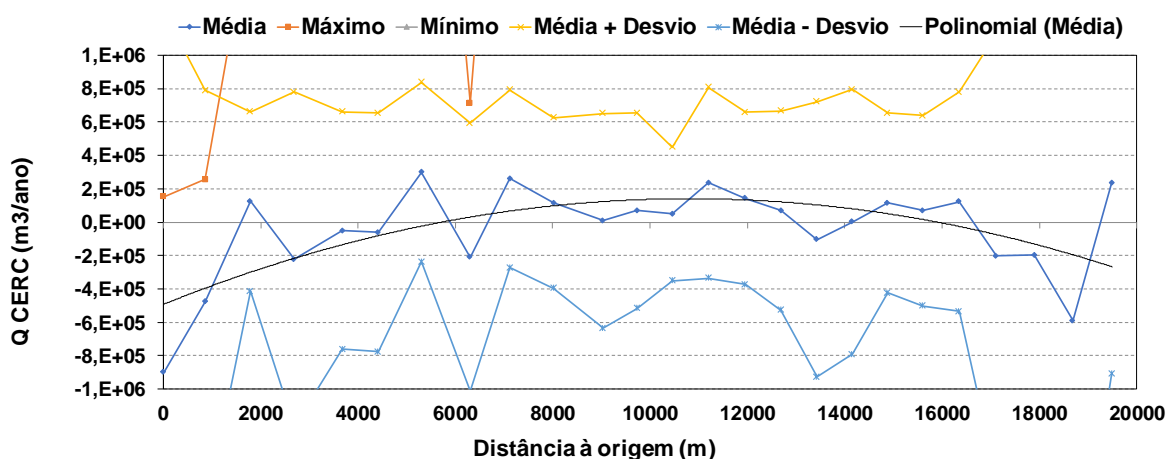


Figura 33 – Evolução do caudal calculado pela fórmula de CERC, a escala reduzida, ao longo do Arco Caparica-Espichel, de norte para sul.

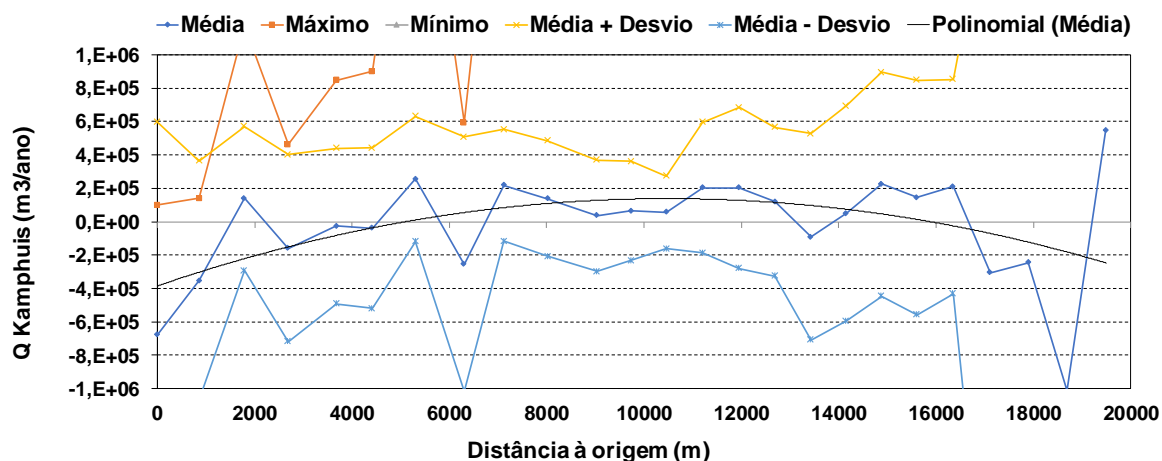


Figura 34 – Evolução do caudal calculado pela fórmula de Kamphuis, a escala reduzida, ao longo do Arco Caparica-Espichel, de norte para sul.

Resumindo, é possível encontrar um ponto de divergência (possível zona de erosão) entre as zonas A e B, Figura 35, e um ponto de convergência (possível zona de deposição sedimentar) entre B e C. Não obstante estes resultados, quer observando a Figura 35 quer em termos de outras observações e do conhecimento geral deste trecho litoral, não existem evidências geomorfológicas da existência destes pontos de convergência e divergência. Note-se ainda que a zona de confluência de transporte sedimentar entre os trechos B e C coincide aproximadamente com a localização da abertura da Lagoa de Albufeira, que fecha naturalmente no período pós-verão (entre setembro e dezembro, vide Dodet *et al.*, (2010) [1]), ou seja, pela ação da agitação marítima mais intensa. Assim, embora passa haver alguma interferência da dinâmica sedimentar longilitoral com a dinâmica sedimentar gerada pelas correntes de maré na Lagoa de Albufeira, no período de verão, tal deve ser irrelevante para o balanço global, pois no período de maior intensidade energética a laguna está fechada e, portanto, não ocorrem interações sedimentares com esta.

Acresce que Taborda *et al.* (2014) [12], induzem (da análise da bibliografia disponível) que o transporte longilitoral no trecho intermédio, em frente à Praia da Rainha, é dirigido de Sul para Norte e da ordem de  $1 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano. Ou seja, embora os presentes resultados concordem na ordem de grandeza dos transportes médios máximos, embora aqueles autores afirmem que magnitude é incerta e foi objeto de estimativas muito díspares, a presente estimativa da direção do transporte no trecho intermédio, apesar do seu caráter oscilatório (Figura 33 e Figura 34), aparenta ser maioritariamente dirigida para Sul e é a contrária à defendida pelos mesmos autores!

Note-se que Dodet *et al.* (2010) [1] calculou o transporte longitudinal potencial em frente à Lagoa de Albufeira, através da fórmula de Kamphuis, a partir da mesma série (que a usada neste trabalho) de 65 anos de dados de agitação marítima ao largo, tendo obtido uma estimativa do balanço do transporte longitudinal médio dirigido para sul, da ordem de 220 000 m<sup>3</sup>/ano, ou seja, concordante com as presentes estimativas naquela zona.

Note-se ainda, em termos comparativos da magnitude do transporte sedimentar médio com o de outras zonas de Portugal continental, que o transporte longilitoral da ordem da centena de milhar de metros cúbicos anuais é dez vezes inferior ao transporte sedimentar médio na costa oeste portuguesa, a norte do Cabo Carvoeiro, e da mesma ordem ou inferior ao transporte longilitoral que ocorre no trecho da costa Sul, de Quarteira ao Cabo de Santa Maria.



Figura 35 – Linhas representativas da direção do transporte sedimentar – Sentido Norte (Vermelho); Sentido Sul (Verde).

As figuras apresentadas seguidamente permitem comparar com mais detalhe os resultados obtidos pelas duas expressões.

A Figura 36, analisa o caudal médio anual obtido pela fórmula de CERC e Kamphuis e compara ainda com a direção de onda média relativa à costa, em cada ponto. Foi obtido o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), para as duas expressões, que se verificou ser bom para ambas (0.69 para a expressão de CERC e 0.53 para a de Kamphuis), traduzindo, como seria de esperar, uma elevada dependência do transporte sedimentar com a direção da agitação marítima, apesar de se tratarem de valores médios globais para as duas variáveis. Também é possível verificar que para  $\alpha < 0^\circ$  correspondem caudais também negativos, ou seja, com direção de Sul para Norte. O oposto se verifica para  $\alpha > 0^\circ$ , onde a deriva litoral acontece de Norte para Sul, com exceção das estimativas do caudal nos pontos com  $x > 16500$  m, que são negativas apesar do ângulo médio ser positivo.

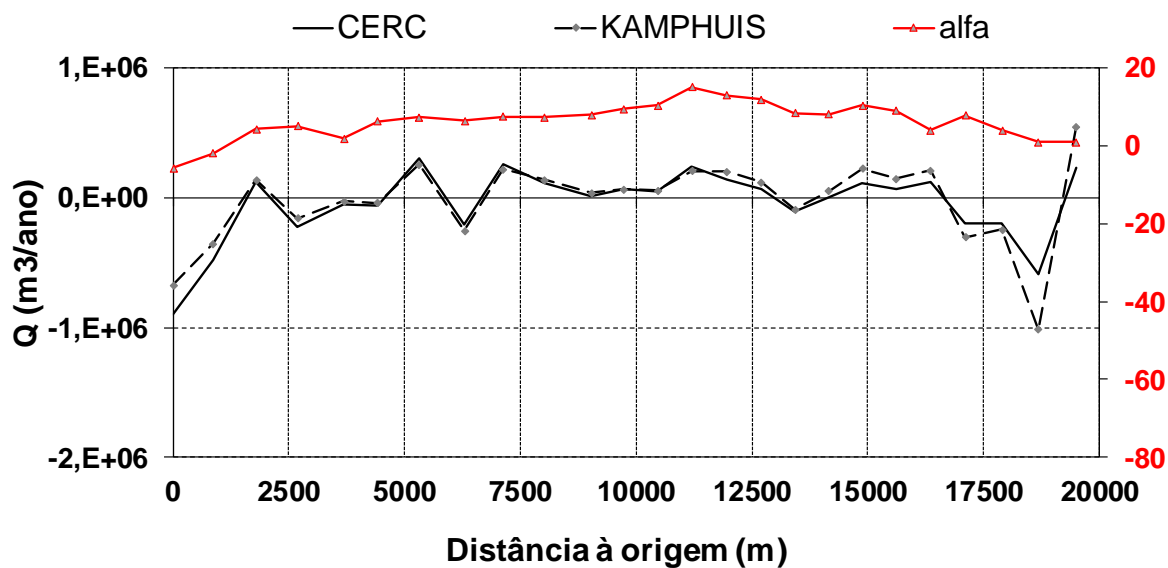


Figura 36 - Gráfico comparativo entre o caudal (m3/ano) calculado pelas expressões de CERC e Kamphuis e o rumo médio de onda (°).

Seguidamente, apresenta-se também a variabilidade espacial dos caudais neste caso comparados com a altura significativa média das ondas, Figura 37.

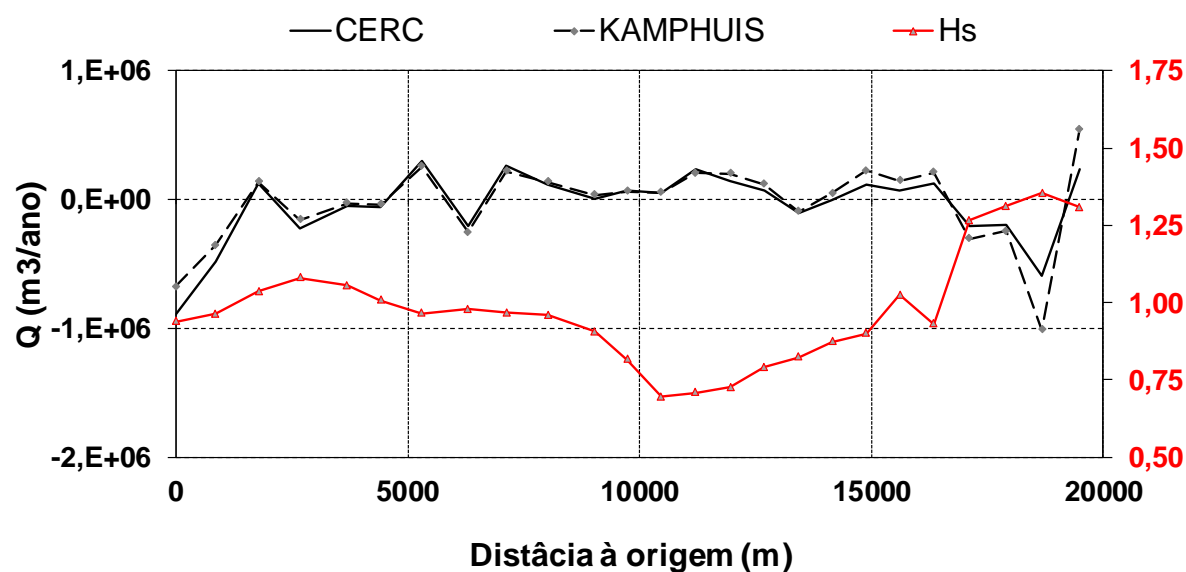


Figura 37 - Gráfico comparativo entre o caudal (m3/ano) calculado pelas expressões de CERC e Kamphuis e a altura significativa média de onda (m).

Também foram analisados os coeficientes de correlação entre as alturas de onda significativa e os caudais registados, neste caso com as magnitudes (ou valores absolutos) destes, obtendo-se resultados de 0,29 para a expressão de CERC e de 0,55 para a de Kamphuis. Estes resultados correspondem a boa ou elevada correlação para a segunda fórmula e fraca para a primeira, eventualmente sugerindo que a potência de  $H_s$  na fórmula de Kamphuis, igual a 2, traduz melhor a



dependência existente para os valores médios globais destas variáveis que a potência que intervém na expressão de CERC (igual a 2,5). Significa ainda que valores superiores de altura de onda correspondem também a valores superiores de volume sedimentar transportado, como se pode observar no ponto de ordenada  $x=18683$  m (Ponto 29), onde se verificam valores de caudais na ordem dos  $-1,0 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano para uma altura máxima de onda de 1,35m.

### 5.3. Variabilidade Sazonal

Nesta secção apresentam-se os resultados da variabilidade espacial de transporte sedimentar obtidos para as duas épocas sazonais (Inverno e Verão), comparando com os valores médios globais obtidos em 5.2. A análise foi realizada de forma semelhante ao apresentado no capítulo anterior, no entanto, distinguem-se uma vez mais os resultados obtidos pelas duas expressões, CERC e Kamphuis, respetivamente.

É possível observar pelas Figura 38 e Figura 39, que ambas as formulações traduzem o mesmo comportamento ao longo do arco. Verifica-se que no Inverno os valores anuais médios de caudal são bastante mais significativos que os de Verão, que por sua vez, são sempre inferiores a  $\pm 1 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano ao longo de todo o trecho. Avaliando comparativamente os resultados obtidos entre as duas expressões, verifica-se que, apesar de ambas mostrarem um comportamento semelhante espacialmente, a utilização da expressão de Kamphuis apresenta valores superiores em módulo.

Estes resultados aparentam estar em conformidade com os resultados obtidos no capítulo anterior, ou seja, é possível afirmar então que, como seria de esperar, para uma maior intensidade marítima, que ocorre no Inverno marítimo, advém um maior fluxo de transporte sedimentar.

Note-se também, que tanto num período como no outro, é possível identificar um transporte litoral dirigido para Norte, nos extremos Norte e Sul do trecho arenoso, e transporte dirigido para Sul na zona intermédia entre a praia da Rainha e a Praia do Meco.

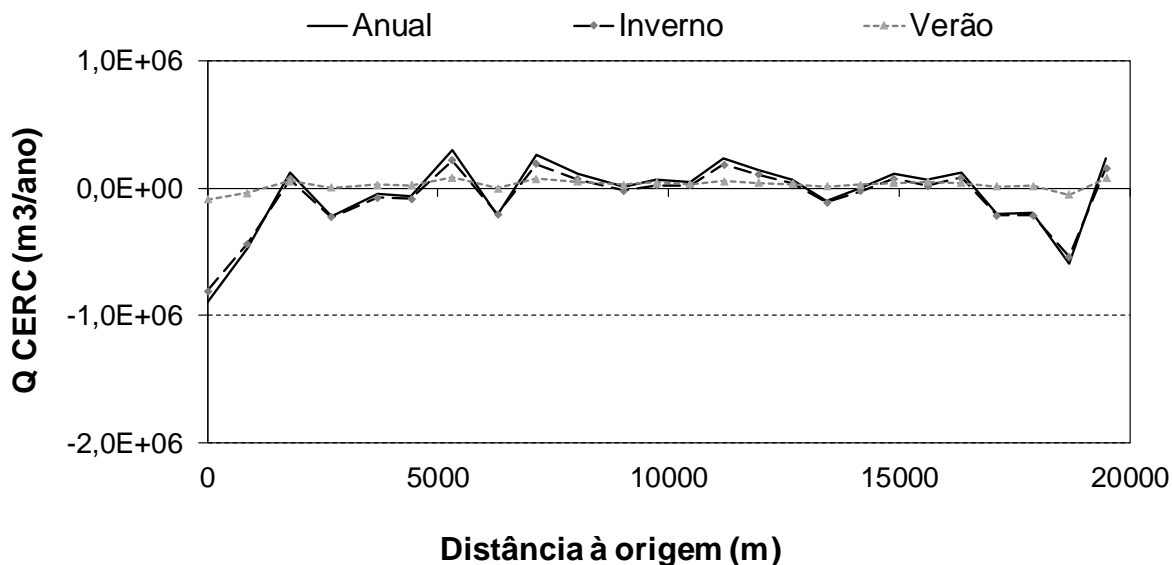


Figura 38 - Evolução do caudal de transporte sedimentar, calculado pela fórmula de CERC, ao longo do local de estudo: média total, no período de inverno e no período de verão.

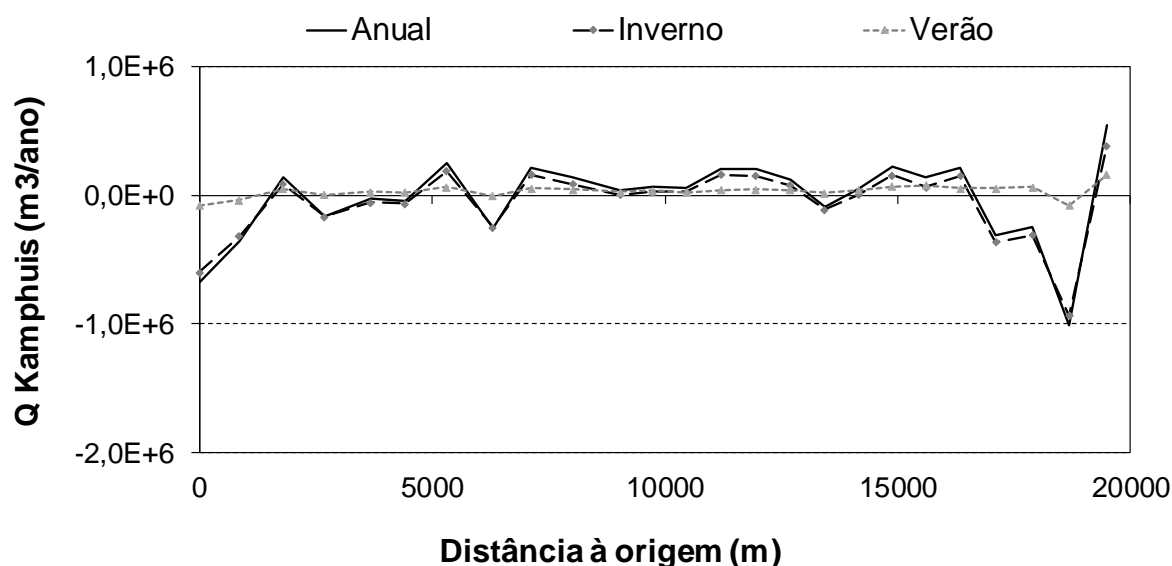


Figura 39 - Evolução do caudal de transporte sedimentar, calculado pela fórmula de Kamphuis, ao longo do local de estudo: média total, no período de inverno e no período de verão.

Os resultados obtidos utilizando a fórmula de CERC registam, no período de Inverno, Figura 38, o maior caudal de sedimentos transportados para Norte na ordem dos  $-8 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano, no ponto mais a norte do cabo (Ponto 1, x=0 m, Cova do Vapor), contrariamente ao obtido pela expressão de Kamphuis, que apresenta um valor superior em módulo, de  $-9,35 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano, no ponto de ordenada x = 18683 m (Ponto 29, Praia do Meco).

Os maiores valores de transporte sedimentar direccionado para Sul, também se encontram em locais distintos para as duas expressões. Tem-se um valor máximo de  $+2,17 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano para a zona

localizada a  $x = 5305$  m (Ponto 7, Praia da Rainha), calculado pela expressão de CERC, e  $+3,9 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/ano no ponto  $x = 19491$  m (Ponto 30, Meco), pela de Kamphuis.

É importante referir a contrariedade de valores observados na zona das praias do Meco, onde temos valores elevados de transporte sedimentar com sentidos opostos.

Seguidamente, analisam-se em maior detalhe os caudais obtidos através das duas expressões ao longo dos 65 anos, para tal, à semelhança do capítulo anterior, subdividiu-se a informação em 4 períodos diferentes como forma de analisar a variabilidade espacial em cada estação do ano:

- Janeiro, fevereiro e março (JFM) - Inverno;
- Abril, maio e junho (AMJ) - Primavera;
- Julho, agosto e setembro (JAS) - Verão;
- Outubro, novembro e dezembro (OND) - Outono.

Os gráficos apresentados nas Figura 40 e Figura 41 traduzem a evolução do caudal calculado pelas fórmulas de CERC e Kamphuis respetivamente.

Em concordância com os resultados obtidos na caracterização da agitação marítima, registam-se valores superiores de transporte sedimentar para os meses de Inverno marítimo (Outono e Inverno). O contrário acontece para os meses representativos do Verão marítimo (Primavera e Verão).

Note-se que os pontos notáveis são exatamente os mesmos que os da análise anterior, sendo que o valor em módulo de caudal sedimentar aumenta consoante a intensidade de agitação marítima, ou seja, dos meses de Verão marítimo (AMJ e JAS) para os de Inverno (OND e JFM).

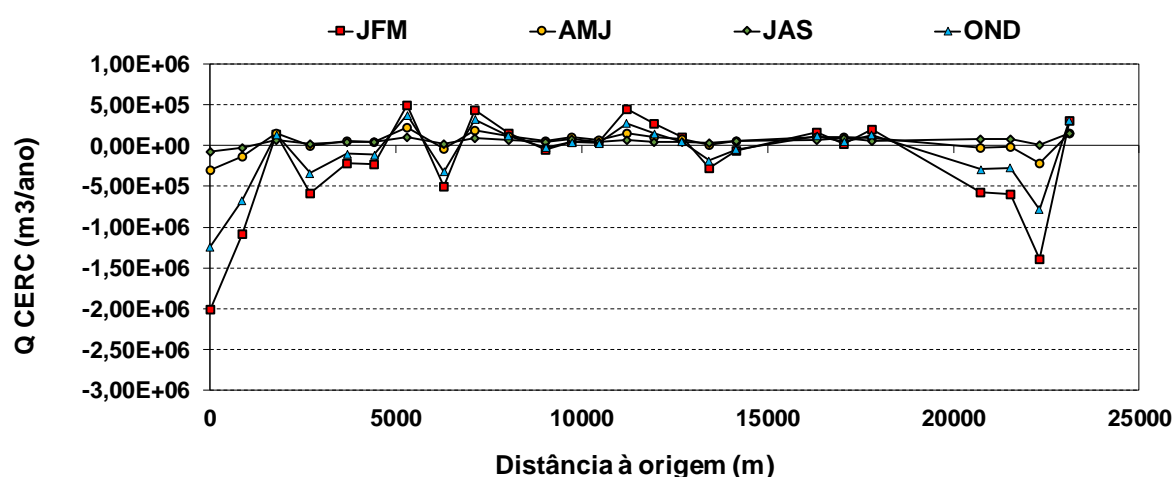


Figura 40 - Evolução do caudal médio calculado pela fórmula de CERC, para cada grupo trimestral, de norte para sul.

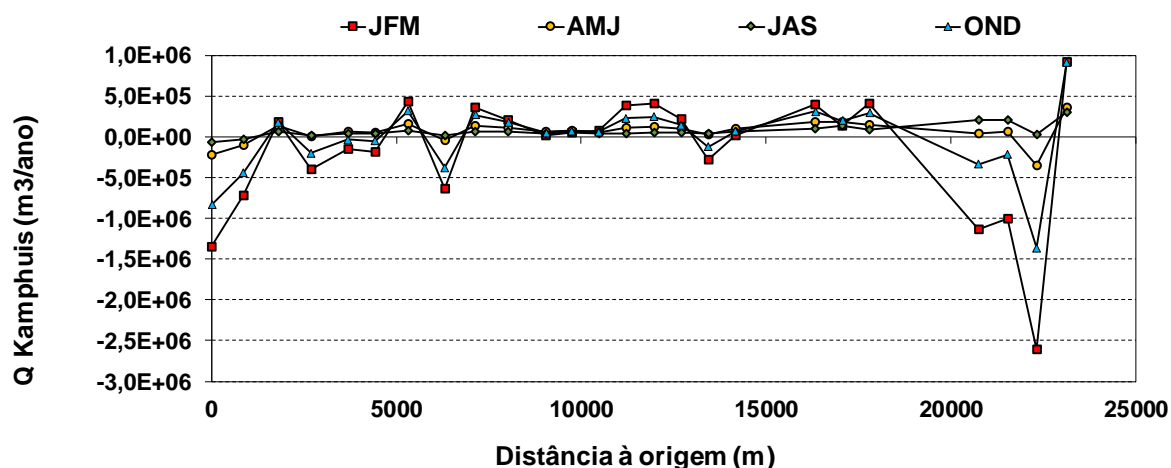


Figura 41 - Evolução do caudal médio calculado pela fórmula de Kamphuis, para cada grupo trimensal, de norte para sul.

## 5.4. Variabilidade Temporal

Para esta secção, será analisada a variação de caudal transportado ao longo dos 65 anos de estudo, onde para cada ano e para cada trimestre (ou seja, para JFM, AMJ, JAS e OND respetivamente) foram retirados os valores médios de  $Q(m^3/ano)$  pelas expressões de CERC e Kamphuis.

Relembrando a metodologia adotada no capítulo 3, apenas foram estudados os caudais para 5 localizações distribuídas ao longo do arco Caparica-Espichel:

- **Ponto A** – Esporão da Costa de Caparica, EC7 (Ponto 3,  $x=1789m$ );
- **Ponto B** – Praia da Rainha (Ponto 8,  $x=6299m$ );
- **Ponto C** – Fonte da Telha (Ponto 14,  $x=11202m$ );
- **Ponto D** – Lagoa de Albufeira (Ponto 23,  $x=17797m$ );
- **Ponto E** – Meco (Ponto 27,  $x=20741m$ ).

Na secção anterior foi possível observar uma predominância de deriva litoral direcionada para Sul, com exceção dos pontos B (Praia da Rainha) e E (Meco), que apresentavam valores direcionados para Norte nos meses correspondentes ao Inverno marítimo. Curiosamente, no ponto A os valores médios do transporte são de sinal contrário aos valores médios dos seus pontos vizinhos, tornando este ponto um caso peculiar.

Através da análise realizada nesta secção confirmam-se os resultados anteriormente obtidos. Da Figura 42 à Figura 44, são apresentados os caudais calculados em cada uma das 5 zonas, respetivamente, pelos dois métodos e ambos traduzem o mesmo comportamento.

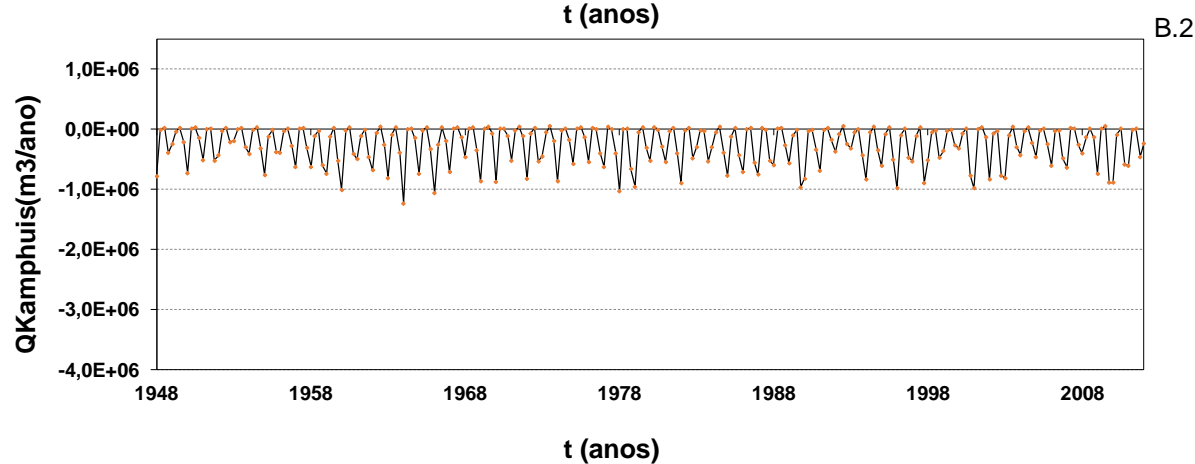
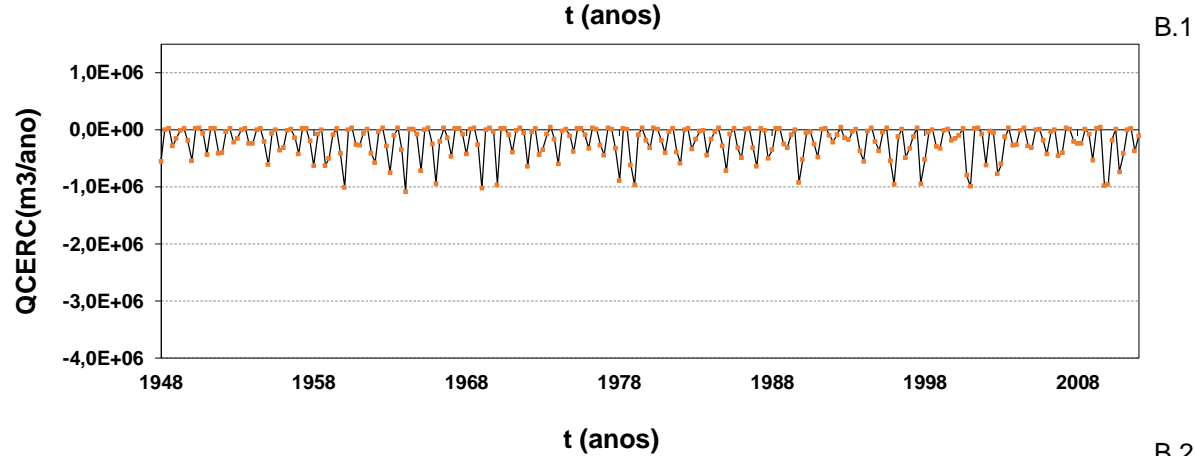
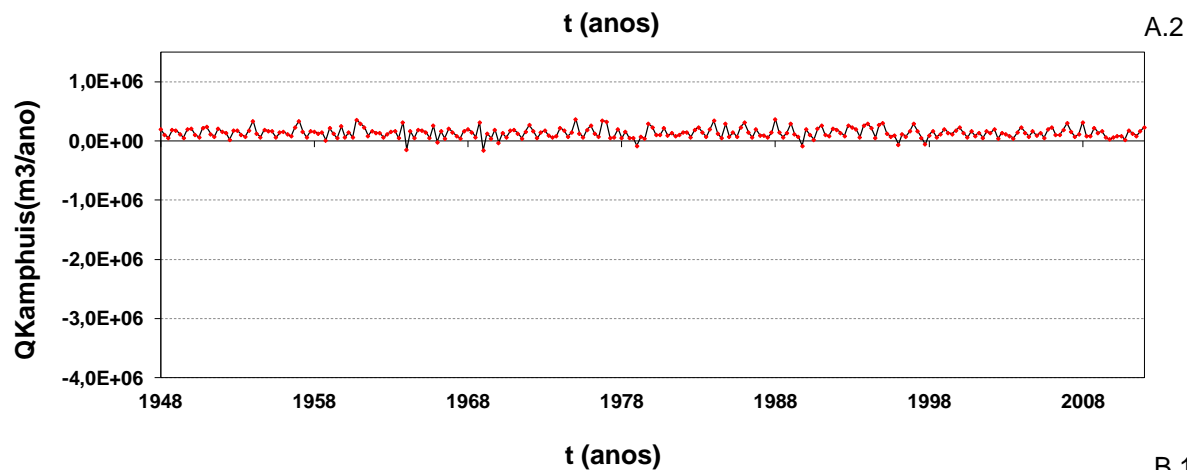
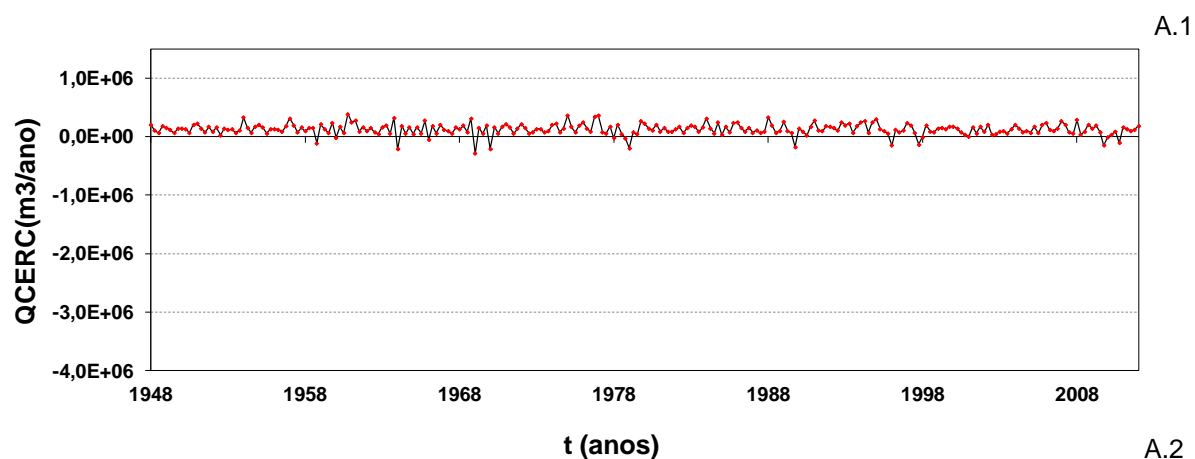


Figura 42 - Evolução do caudal de transporte de sedimentar, calculado pelas fórmulas de CERC e Kamphuis, nos pontos A e B (EC7 e Praia da Rainha respetivamente).

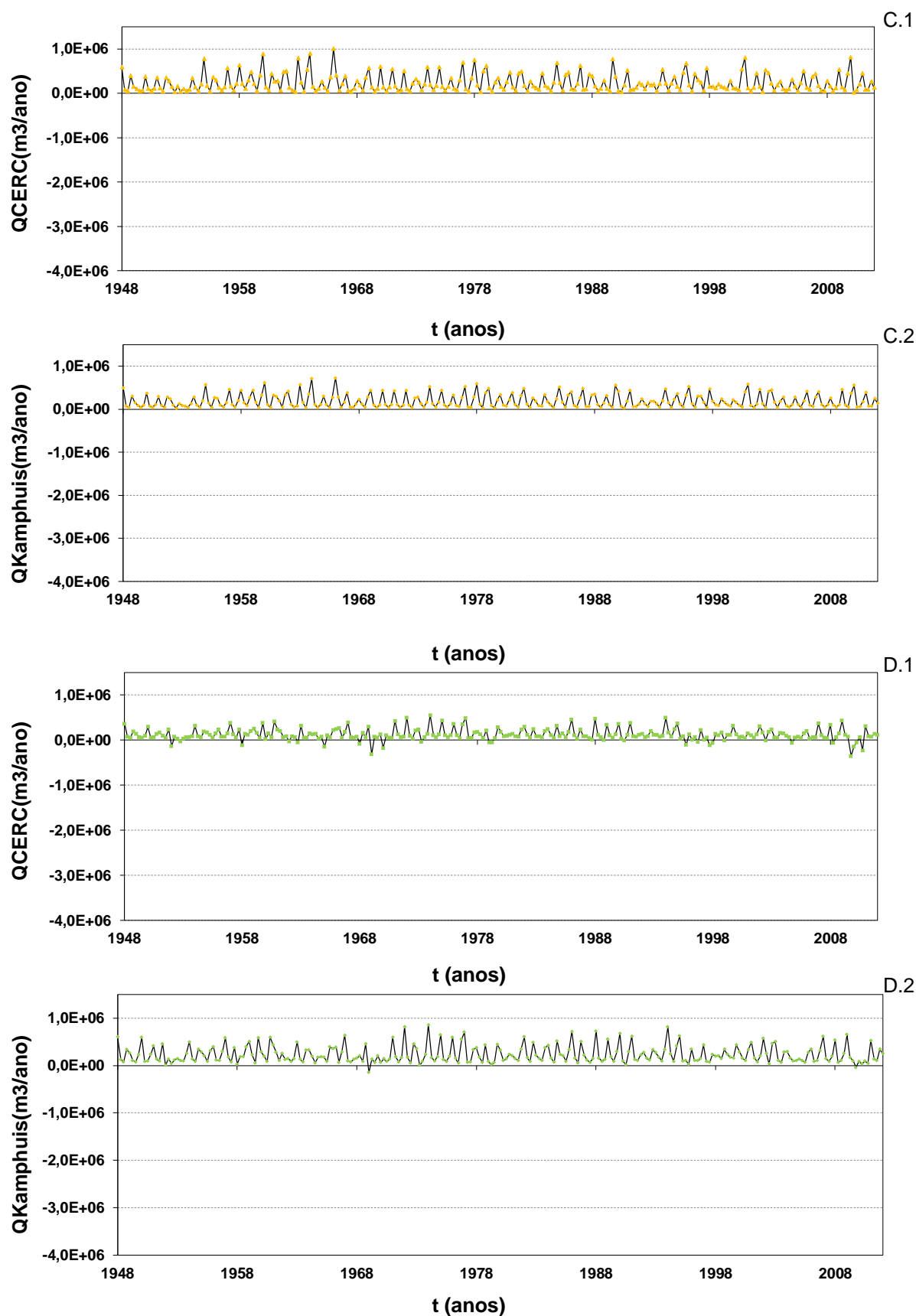


Figura 43 - Evolução do caudal de transporte de sedimentar, calculado pelas fórmulas de CERC e Kamphuis, nos pontos C e D (Fonte da Telha e Lagoa de Albufeira respetivamente).

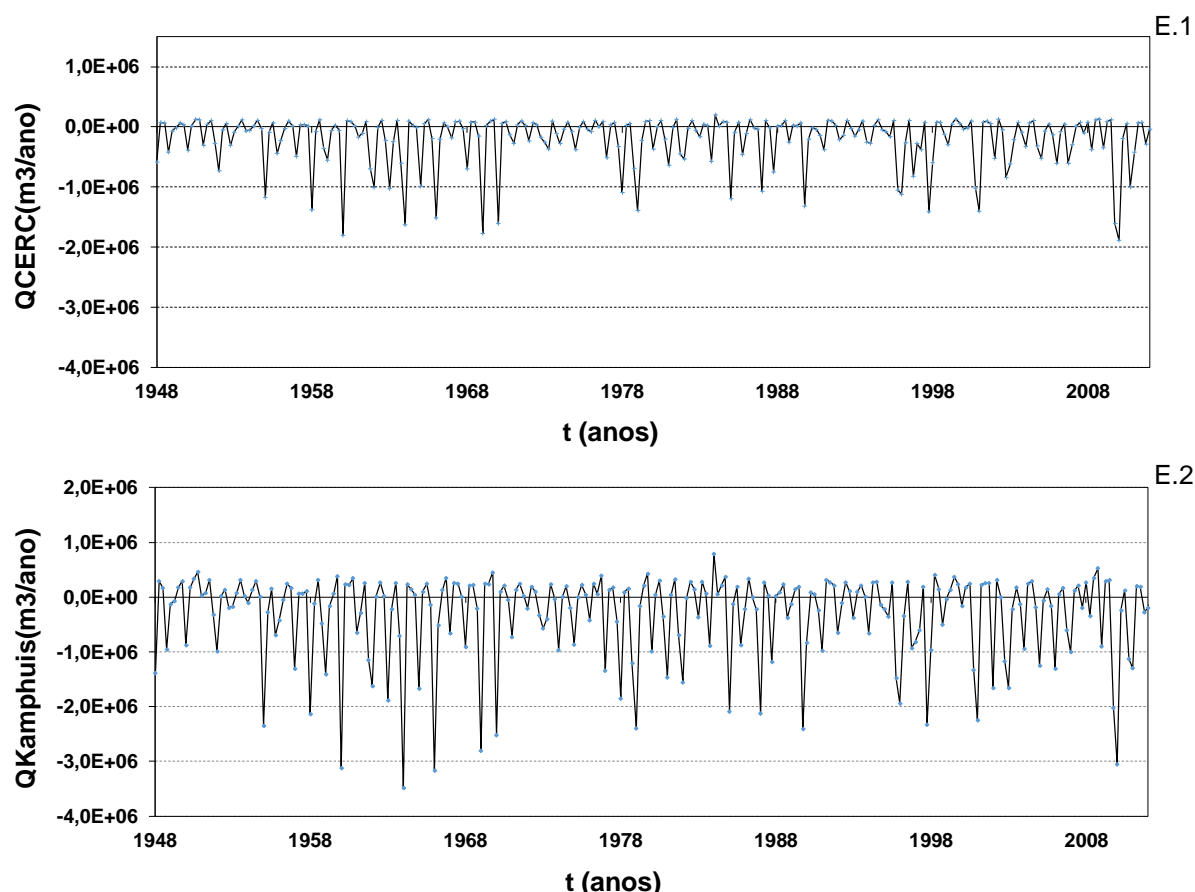


Figura 44 - Evolução do caudal de transporte de sedimentar, calculado pelas fórmulas de CERC e Kamphuis, no ponto E (Meco).

Verifica-se a existência de um maior volume de sedimentos transportados para as zonas da praia do Meco, no sentido de Sul para Norte, chegando a atingir valores na ordem dos  $-3,5 \times 10^6$  m³/ano, calculado pela expressão de Kamphuis, Figura 44– E.2), e  $+1,0 \times 10^6$  m³/ano, calculado pela expressão de CERC na zona da praia da Rainha no sentido de Norte para Sul, (Figura 42– B.1).

## 5.5. Análise e Comparação de Resultados com os de Taborda *et al.* (2014)

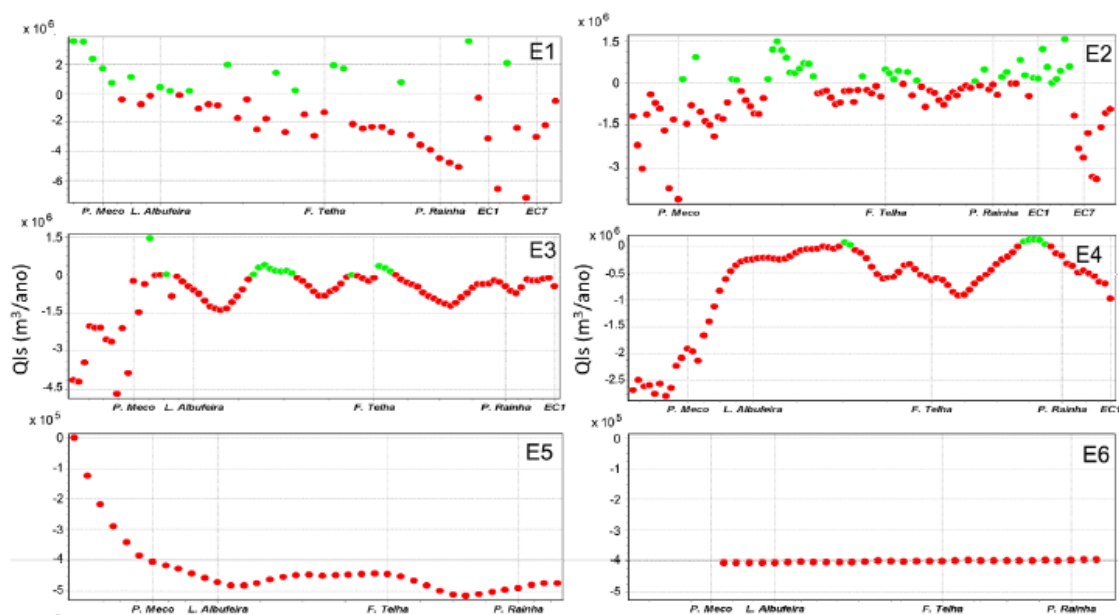
Para esta secção, limitou-se a escala temporal realizada no subcapítulo anterior para um período de 25 anos, compreendido entre 1970 e 1995, permitindo assim a comparação com o trabalho desenvolvido por Taborda *et al.* [12]. Mais precisamente, são comparados os volumes anuais obtidos nesta dissertação pelas expressões de CERC e Kamphuis, com os respetivos valores obtidos pelas abordagens utilizados pelos autores.

Os resultados obtidos por Taborda *et al.* (2014) [12], são representados na Figura 45. Para esta análise os autores utilizaram 6 abordagens de modelação distintas, E1 a E6, sendo que a estratégia E2 aparenta ser a mais próxima ao método utilizado na presente dissertação. A metodologia

E2 identificou para cada onda, através do domínio computacional e cada passo de tempo, o centro da célula imediatamente a barlar da que contém a rebentação, extraíndo a orientação do fundo e as características da onda. Seguidamente, calcularam os resultados da deriva litoral ao longo da costa em intervalos espaçados de 200m, entre a Cova do Vapor e a Praia das Bicas. Note-se que na Figura 45 o extremo norte do sistema arenoso está representado à direita do eixo das abcissas e o extremo sul à esquerda, contrariamente à representação adotada nesta dissertação. Ainda na mesma figura, os transportes positivos são os dirigidos para Sul e os negativos dirigidos para Norte, coincidente com sentido aqui adotado.

Contrariamente aos resultados obtidos nesta dissertação, esta estratégia (E2) conclui que “em todo o arco predomina o transporte sólido para norte com exceção de determinados troços com extensão quilométrica: praia de São João à praia da Rainha e a região da Fonte da telha e Mina de Ouro” [12], (também designado por Praia da Adiça, a meia distância entre a Lagoa de Albufeira e a Fonte da Telha).

No entanto, também concluem os autores que nesta abordagem existe uma elevada variabilidade espacial e valores da magnitude da deriva litoral muito elevados a sul da praia do Meco e na praia de São João (ambos da ordem de  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano).



**Figura 45 - Variação do resíduo anual da deriva litoral ao longo do arco Caparica-Espichel calculada através de 6 estratégias de modelação distintas (E1 a E6); Verde – para Sul; Vermelho – para Norte; Imagem retirada de Taborda *et al.* (2014) [12].**

Os valores obtidos na presente dissertação para o período de 25 anos são os apresentados na Figura 46, Figura 47 e Figura 48, e traduzem um comportamento um tanto oposto aos obtidos por Taborda *et al.* (2014) [12]. Utilizando tanto a fórmula de CERC como a de Kamphuis, obtiveram-se resultados que indicam uma tendência de transporte maioritariamente dirigido para Sul nos pontos



correspondentes ao EC7, Fonte da Telha e Lagoa de Albufeira, enquanto que na Praia da Rainha e na zona do Meco, se verifica uma deriva litoral direccionada para Norte.

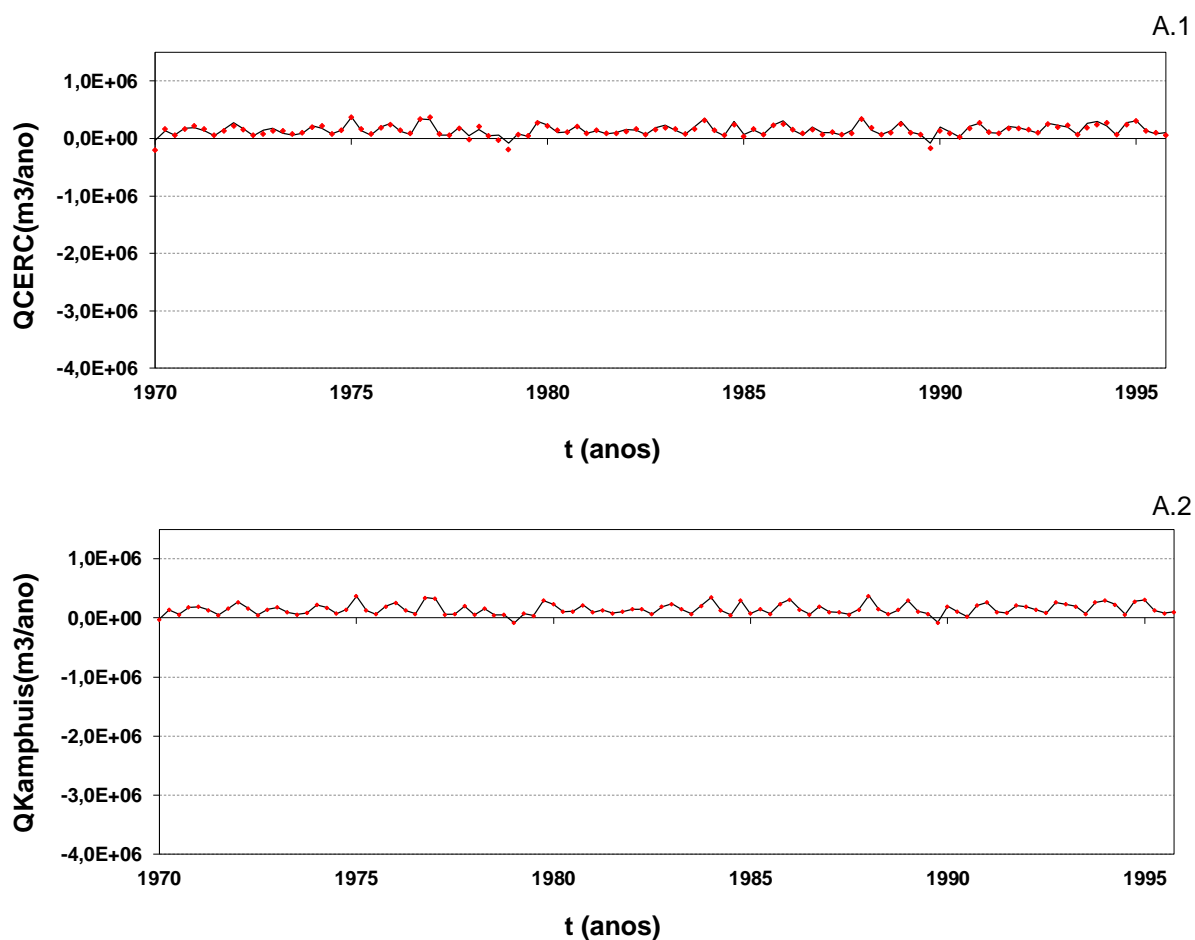


Figura 46 - Evolução do caudal de transporte de sedimentar entre o período de 1970 e 1995, calculado pelas fórmulas de CERC e Kamphuis, no ponto A (EC7).

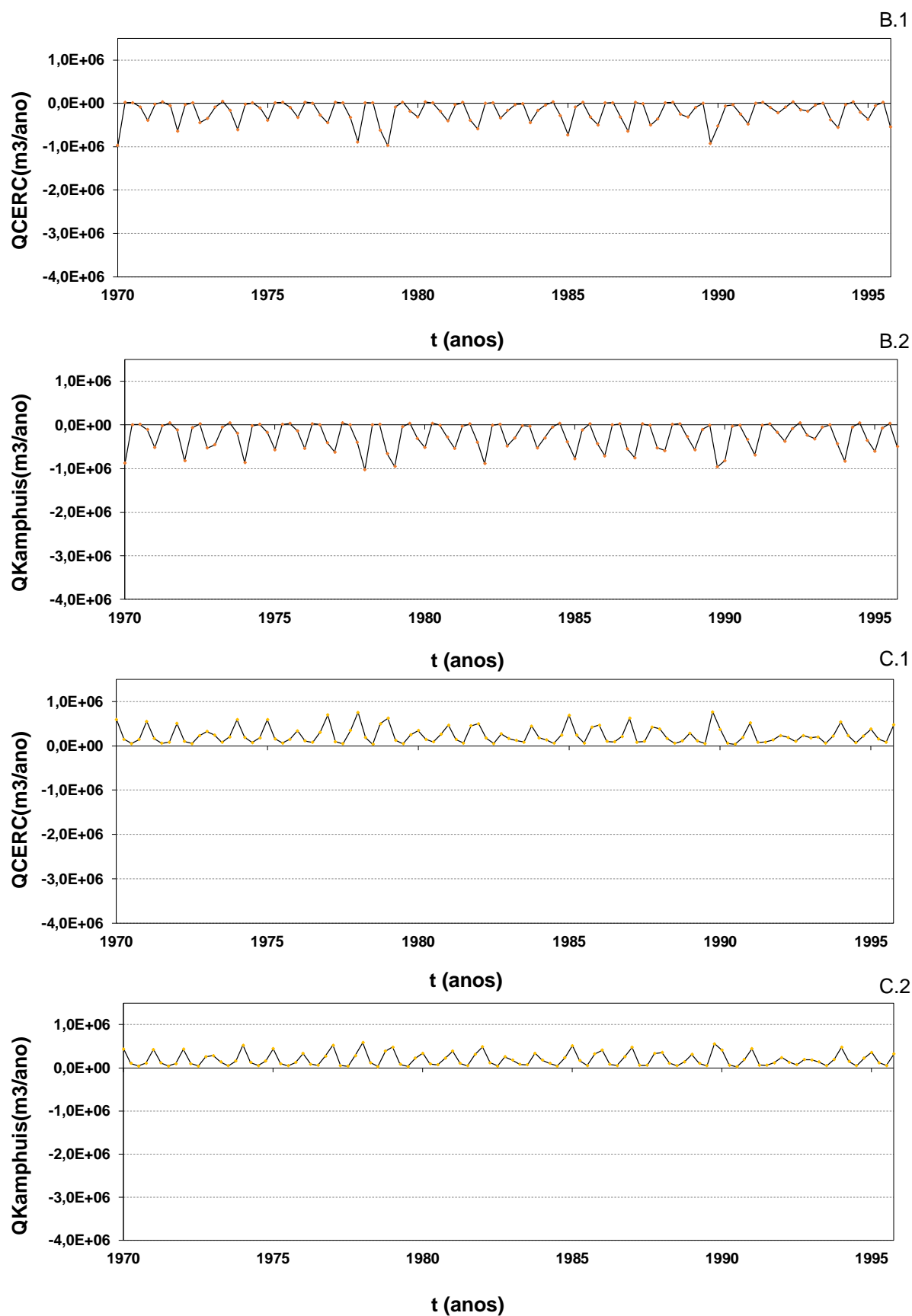


Figura 47 - Evolução do caudal de transporte de sedimentar entre o período de 1970 e 1995, calculado pelas fórmulas de CERC e Kamphuis, nos pontos B e C (Praia da Rainha e Fonte da Telha respetivamente).

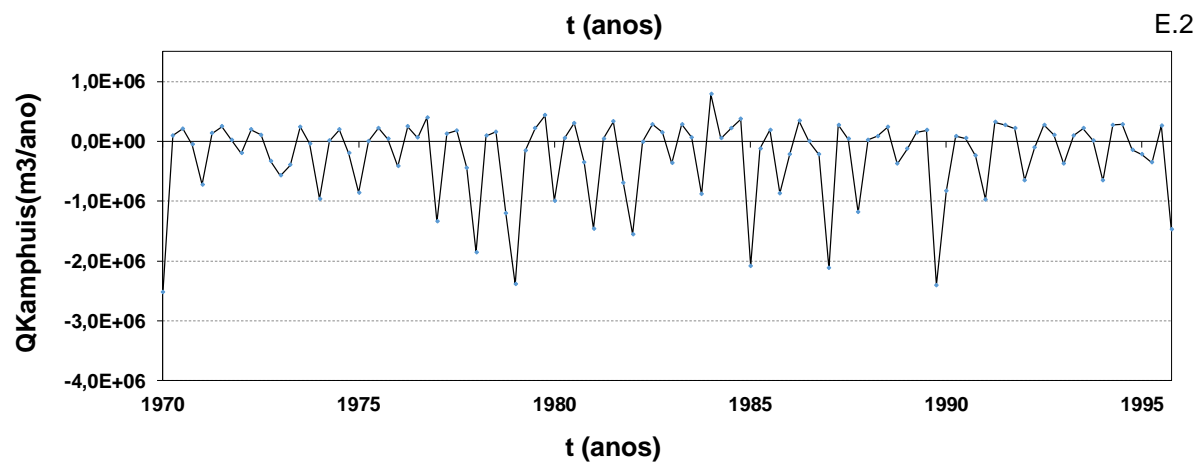
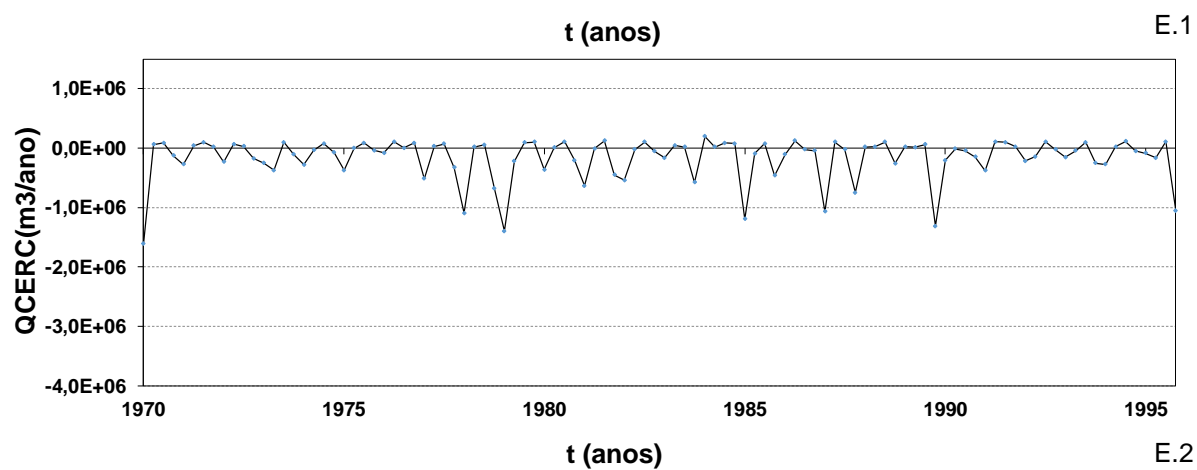
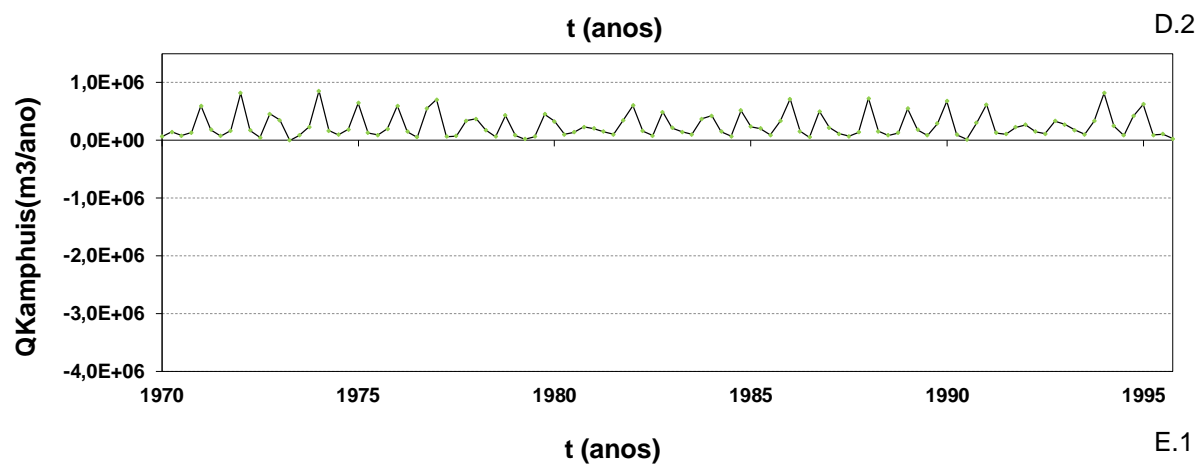
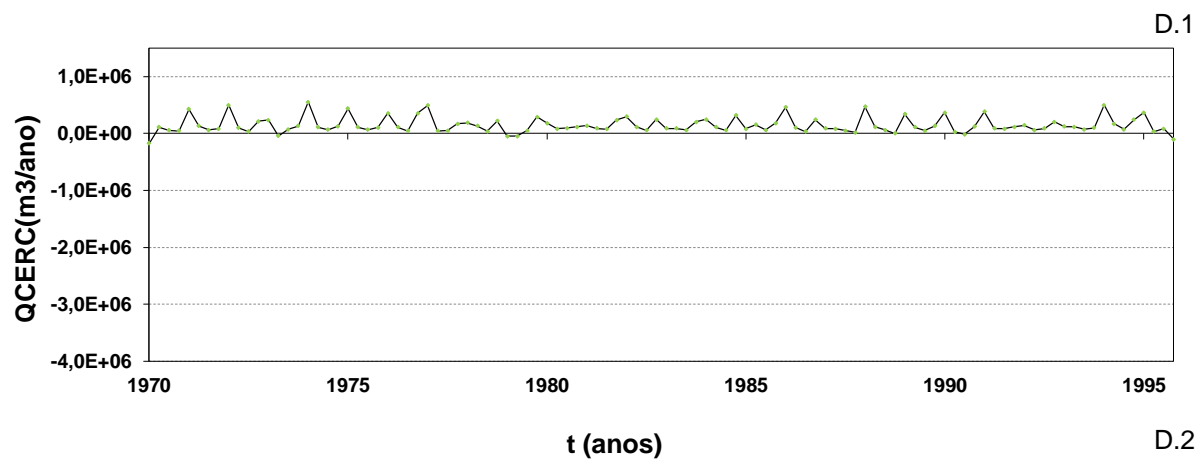


Figura 48 - Evolução do caudal de transporte de sedimentar entre o período de 1970 e 1995, calculado pelas fórmulas de CERC e Kamphuis, nos pontos D e E (Lagoa de Albufeira e Meco respetivamente).

Como referido anteriormente, as diferenças encontradas na metodologia desta dissertação comparativamente às da estratégia E2 de Taborda *et al.* (2014) [12] traduzem na generalidade comportamentos opostos, embora hajam alguns locais com comportamentos semelhantes (Figura 49). Contudo, enquanto aqueles autores concluem que existe uma predominância de transporte no sentido de Sul para Norte, os resultados apresentados nesta dissertação demonstram exatamente o oposto no setor central (da Praia da Rainha à lagoa de Albufeira). Estas diferenças ilustram a enorme sensibilidade da estimativa da deriva litoral em sistemas com forte predominância de agitação marítima com pequena obliquidade, e que mesmo usando abordagens idênticas (os dados de origem e o modelo de propagação de ondas em ambos os casos foram iguais), pequenas diferenças na aplicação dos modelos e/ou na definição da linha de costa (e da sua perpendicular) podem conduzir a resultados discordantes.

Reforçando esta última conclusão, note-se que Taborda *et al.* (2014) [12] desenvolveram ainda as estratégias E5 e E6, que “resolvem o balanço sedimentar em todo o domínio em cada passo de cálculo e permitem explicitar relações retroativas entre a evolução da faixa costeira e as características do forçamento na rebentação”. De acordo com os resultados dessas estratégias, o transporte sedimentar médio anual passa então somente a ocorrer de Sul para Norte, sem variações de direção, e com magnitudes da ordem da centena de milhar de metros cúbicos por ano (Figura 45). Ou seja, utilizando os mesmos dados de origem e alterando a estratégia de modelação (introduzindo um feedback da deriva na orientação da linha de costa em cada passo de cálculo), os resultados advêm muito diferentes.

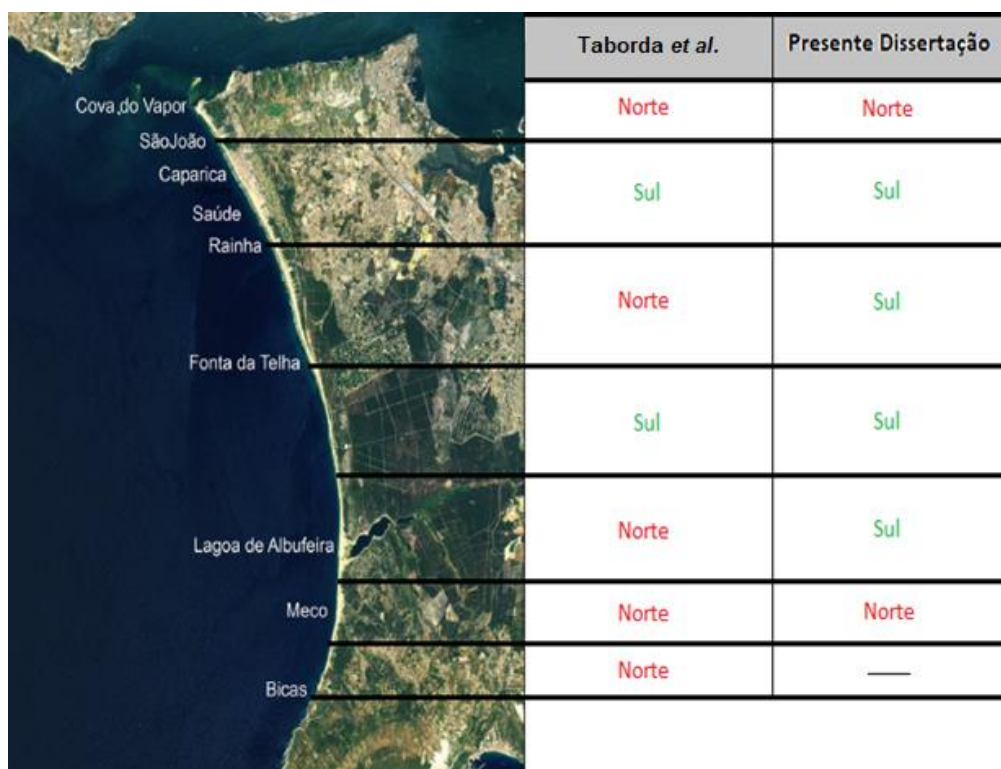


Figura 49 - Comparação dos sentidos da deriva litoral ao longo do arco Caparica-Espichel, entre os resultados de Taborda e Andrade (2014) e os obtidos nesta dissertação.

## 6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

### 6.1. Principais Conclusões

O principal objetivo desta dissertação era saber qual o sentido dominante e a magnitude estimada do transporte longilitoral ao longo do Arco Caparica-Espichel. Para tal, determinaram-se diversos parâmetros representativos da agitação marítima para todo o arco Caparica-Espichel, para um período de 65 anos, compreendido entre 01/01/1948 e 31/12/2012, assim como os caudais potenciais longilitorais de sedimentos, calculados através da utilização das fórmulas empíricas obtidas por CERC [16] e Kamphuis [15]. Considerou-se para esta análise um conjunto de 36 pontos distribuídos por todo o litoral da península de Setúbal, com profundidades de aproximadamente 5.0m, próximas da profundidade de rebentação das ondas.

Pela análise da direção média de propagação das ondas relativamente à costa, e com os resultados anteriormente obtidos do volume de sedimentos transportado, no período global e nos períodos sazonais de inverno e verão, conclui-se que existe uma predominância de transporte direcionado de Norte para Sul, com exceção dos extremos do arco. Verificou-se que desde o extremo na Cova do Vapor até à zona da Praia da Rainha, e a partir da Praia do Meco até ao extremo mais a Sul do trecho arenoso, a direção do transporte potencial de sedimentos se realizava no sentido inverso, ou seja, de Sul para Norte.

Estes resultados vêm contrariar os de Taborda *et al.*(2014) [12], que afirmam no seu trabalho que, na generalidade de todo o arco litoral, a predominância de transporte se dá de Sul para Norte. Apesar de existirem muitas semelhanças nas metodologias utilizadas, é necessário ter em conta a sensibilidade da estratégia de modelação adotada no resultado final, pelo que, este assunto deverá continuar a ser investigado.

Conclui-se também, pelos resultados obtidos na análise da variabilidade sazonal, como seria de prever, que o período de Inverno marítimo tem uma maior influência em termos de magnitude no volume de sedimentos transportado. É ainda nesse período que ocorre uma ligeira redução da intensidade do transporte sedimentar dirigido para sul no referido trecho central do arco litoral.

Quando analisados os rumos das ondas relativamente à linha perpendicular à costa,  $\alpha$ , é possível afirmar-se que para  $\alpha < 0^\circ$  obtiveram-se valores de  $Q$  (m<sup>3</sup>/ano) negativos, ou seja, transporte para Norte, e para o oposto,  $\alpha > 0^\circ$ , os valores de caudal são positivos significando, portanto, transporte para Sul.

Finalmente, verificou-se que ambas as expressões utilizadas para efetuar o cálculo do transporte sedimentar, traduziram resultados bastante semelhantes e coerentes com os resultados de agitação marítima e os das intensidades das estimativas de outros autores.

## 6.2. Desenvolvimentos Futuros

De forma a desenvolver este trabalho e a dar suporte aos estudos já realizados por diversos autores, é importante uma análise ainda mais aprofundada, dado que o comportamento do morfodinâmica da costa é algo muito complexo e difícil de prever corretamente.

Numeram-se seguidamente um conjunto de sugestões para trabalhos futuros a fim de complementar o trabalho realizado nesta dissertação.

Inicialmente, seria importante explorar diferentes tipos de malhas utilizadas na modelação, e verificar se utilizando as mesmas expressões se obteriam os mesmos resultados. Sobre este aspeto, a utilização de uma malha mais fina teria permitido obter resultados válidos distribuídos ao longo de todo o arco litoral, eliminando assim os pontos que na presente simulação acabaram por estar definidos em terra ou fora da profundidade dos 5,0 m, e que foram abandonados. Devido à elevada carga computacional, não foi possível neste trabalho realizar uma análise com intervalos de tempo mais curtos, no entanto, seria pertinente um estudo mais aprofundado. Tomando como exemplo a análise da variabilidade temporal realizada, seria interessante explorar em maior detalhe cada ano, ao contrário do método utilizado nesta dissertação, onde só foram determinados 4 valores por ano, correspondentes a médias de 3 meses cada.

Seria também essencial determinar as causas que levaram à diferença dos valores de transporte sedimentar, comparativamente aos outros trabalhos. Seria muito importante investigar e avaliar de forma mais minuciosa a contribuição de cada parâmetro nas expressões de CERC [16] e Kamphuis [15]. Nesta dissertação, por exemplo, foi utilizado o mesmo valor de dimensão de sedimentos em todo o domínio em estudo, pelo que também se sugere a utilização de valores específicos de cada zona.

Foi também utilizada uma única linha de costa, assumida constante ao longo dos 65 anos da simulação, para a determinação das perpendiculares à costa em cada ponto de cálculo, que possibilitaram a determinação da direção da agitação marítima relativamente a esta perpendicular, valor este o utilizado nas expressões de cálculo do transporte longilitoral. Uma abordagem mais exa-ta passaria pela determinação do maior número de posições de linha de costa quantos outros dados o permitissem (p.ex., recorrendo a imagens de fotografias aéreas), que seriam utilizados para os intervalos de tempo síncronos.

Sugere-se ainda a modelação da evolução completa da linha de costa, com recurso aos chamados modelos de linha de costa (ou modelos “1-linha”), para este período, os quais incorporam mecanismos de feedback entre a evolução da linha de costa e a agitação marítima, permitindo determinar com maior acuidade a direção da agitação marítima relativamente à costa, em cada intervalo de cálculo.

# Bibliografia

- [1] G. Dodet, X. Bertin, and R. Taborda, "Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades," *Ocean Model.*, vol. 31, no. 3–4, pp. 120–131, 2010.
- [2] A. Rodrigues and F. Veloso-Gomes, "Alimentações artificiais na costa da caparica," in *VI Congresso - Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 2003, no. 1, p. 16.
- [3] C. Ponte Lira, A. N. Silva, R. Taborda, and C. F. De Andrade, "Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: An integrated approach," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 8, no. 1, pp. 265–278, 2016.
- [4] C. A. Pinto, E. Gomes, and A. Rodrigues, "Dredging and Beach Nourishment: A sustainable sediment Management Approach in Costa da Caparica Beach , Portugal," in *PIANC Dredging 2015*, 2015, no. June.
- [5] F. Sancho, J. Silva, and M. G. Neves, "Avaliação e Quantificação da Intensidade da Agitação Marítima no Arco Caparica-Espichel," in *9ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 2017, no. 1, p. 16.
- [6] S. F. Silva, M. Martinho, R. Capitão, T. Reis, C. J. Fortes, and J. C. Ferreira, "An index-based method for coastal-flood risk assessment in low-lying areas (Costa de Caparica, Portugal)," *Ocean Coast. Manag.*, vol. 144, pp. 90–104, 2017.
- [7] J. Ferreira and M. Laranjeira, "Avaliação da vulnerabilidades e risco biofísico em áreas litorais sob pressão antrópica. Contributo metodológico para uma gestão ambiental," *Geolnova*, no. 2, pp. 153–170, 2000.
- [8] J. A. Dias, "Dinamica Sedimentar e Evolucao Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional - Dissertação de Doutoramento," Universidade de Lisboa, 1987.
- [9] R. Taborda and C. F. de Andrade, "Relatório da Morfodinâmica do Estuário Exterior do Tejo e Intervenção na Região da Caparica." Lisboa, pp. 1–21, 2014.
- [10] CEHIDRO, "Trecho 2: Foz do Douro - Nazaré," in *Notícia Explicativa da Carta de Risco do Litoral*, 1998, p. 37.
- [11] S. Teixeira, "Dinâmica das praias da península de Setúbal (Portugal) - Tese de Mestrado," Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1990.
- [12] R. Taborda, C. F. de Andrade, A. N. Silva, T. M. Silveira, C. Lira, M. C. Freitas, and C. A. Pinto, "Modelo de circulação sedimentar litoral no arco caparica-espichel," *Comun. Geol.*, vol. 101, pp. 641–644, 2014.
- [13] SWAN team, *USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.20A*. The Netherlands, 2016.
- [14] F. Sancho, M. J. Banha, and M. G. Neves, "Variabilidade espacial e sazonal da agitação marítima na proximidade da zona de rebentação no arco litoral Caparica- Espichel," in *5ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 2018, no. 1, pp. 186–189.
- [15] J. . Kamphuis, "Alongshore sediment transport rate," *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, vol. 117, no. 6, pp. 624–641, 1991.
- [16] CERC, *Shore Protection Manual, vols. I and II*. Vicksburg: Coastal Engineering Research Center, USACE, 1984.

- [17] S. H. C. D. Larangeiro and F. S. B. F. Oliveira, "Assessment of the longshore sediment transport at Buarcos beach (West coast of Portugal) through different formulations," *Proc. CoastGis*, no. 1, 2003.
- [18] Z. S. Diogo, T. M. Silveira, H. Sousa, A. M. Carapuço, A. N. Silva, C. Lira, R. Taborda, and C. F. de Andrade, "Estudo de caso da Costa da Caparica - Caracterização da variabilidade morfodinâmica sazonal e pós-temporal das praias da Costa da Caparica," in *Entregável 2.2.c do projeto "Consultoria para a Criação e Implementação de um Sistema de Monitorização do Litoral abrangido pela área de Jurisdição da ARH do Tejo,"* 2013, p. 119.



## **Anexos**



**Tabela A 1 – Parâmetros característicos dos 36 pontos estudados**

<i>Ponto</i>	<i>Profundidade média global (m)</i>	<i><math>\tau</math> (°)</i>	<i>Distância à origem (m)</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Coordenada x AutoCad</i>	<i>Coordenada y AutoCad</i>
1	5,09	56,33	0	38°39'35.33"N	9°15'41.51"W	-98219	-111352
2	4,93	53,86	856	38°39'14.17"N	9°15'12.52"W	-97526	-112013
3	4,88	53,02	1789	38°38'49.89"N	9°14'51.47"W	-97026	-112768
4	4,86	61,61	2683	38°38'24.14"N	9°14'34.24"W	-96619	-113567
5	4,99	58,48	3683	38°38'0.42"N	9°14'11.55"W	-96079	-114305
6	4,91	62,67	4412	38°37'35.77"N	9°13'51.21"W	-95596	-115071
7	5,00	58,21	5305	38°37'10.96"N	9°13'31.32"W	-95124	-115842
8	4,99	70,01	6299	38°36'45.47"N	9°13'13.24"W	-94696	-116633
9	4,97	64,88	7126	38°36'19.09"N	9°12'57.88"W	-94334	-117451
10	4,98	70,90	8023	38°35'52.04"N	9°12'44.54"W	-94021	-118289
11	4,97	76,37	9033	38°35'24.08"N	9°12'34.29"W	-93783	-119154
12	4,68	71,73	9732	38°35'1.06"N	9°12'26.51"W	-93603	-119866
13	4,98	66,99	10464	38°34'39.42"N	9°12'14.12"W	-93311	-120537
14	4,94	64,99	11202	38°34'18.01"N	9°12'0.46"W	-92988	-121201
15	5,45	68,53	11954	38°33'56.81"N	9°11'45.11"W	-92624	-121859
16	5,28	76,06	12692	38°33'34.07"N	9°11'35.61"W	-92402	-122563
17	5,29	81,18	13428	38°33'11.05"N	9°11'27.67"W	-92218	-123275
18	5,58	81,60	14158	38°32'47.85"N	9°11'21.47"W	-92076	-123992
19	-98,72	81,88	14886	38°32'24.89"N	9°11'14.61"W	-91918	-124702
20	-99,00	81,35	15607	38°32'1.95"N	9°11'8.91"W	-91788	-125411
21	5,01	85,19	16330	38°31'38.80"N	9°11'4.15"W	-91681	-126126
22	5,00	91,22	17058	38°31'15.21"N	9°11'3.02"W	-91662	-126854
23	5,00	92,11	17797	38°30'51.35"N	9°11'5.81"W	-91738	-127589
24	-83,69	95,26	18525	38°30'27.74"N	9°11'5.60"W	-91741	-128317
25	-99,00	91,60	19255	38°30'4.09"N	9°11'6.78"W	-91778	-129046
26	-99,00	95,35	19981	38°29'40.55"N	9°11'6.31"W	-91775	-129772
27	5,51	102,31	20741	38°29'15.92"N	9°11'7.77"W	-91819	-130531
28	6,68	104,58	21530	38°28'51.23"N	9°11'16.36"W	-92036	-131290
29	5,87	107,71	22316	38°28'26.42"N	9°11'23.63"W	-92221	-132053
30	5,17	109,10	23123	38°28'2.05"N	9°11'35.82"W	-92525	-132801
31	-99,00	124,47	23910	38°27'37.46"N	9°11'44.53"W	-92745	-133557
32	9,64	117,29	25094	38°27'5.40"N	9°12'11.40"W	-93408	-134538
33	9,02	125,18	26255	38°26'33.07"N	9°12'35.87"W	-94013	-135528
34	5,78	120,75	27364	38°25'59.86"N	9°12'53.44"W	-94451	-136547
35	-99,00	97,79	28454	38°25'24.73"N	9°12'58.48"W	-94586	-137629
36	-99,00	209,70	29571	38°24'51.48"N	9°13'16.69"W	-95040	-138649



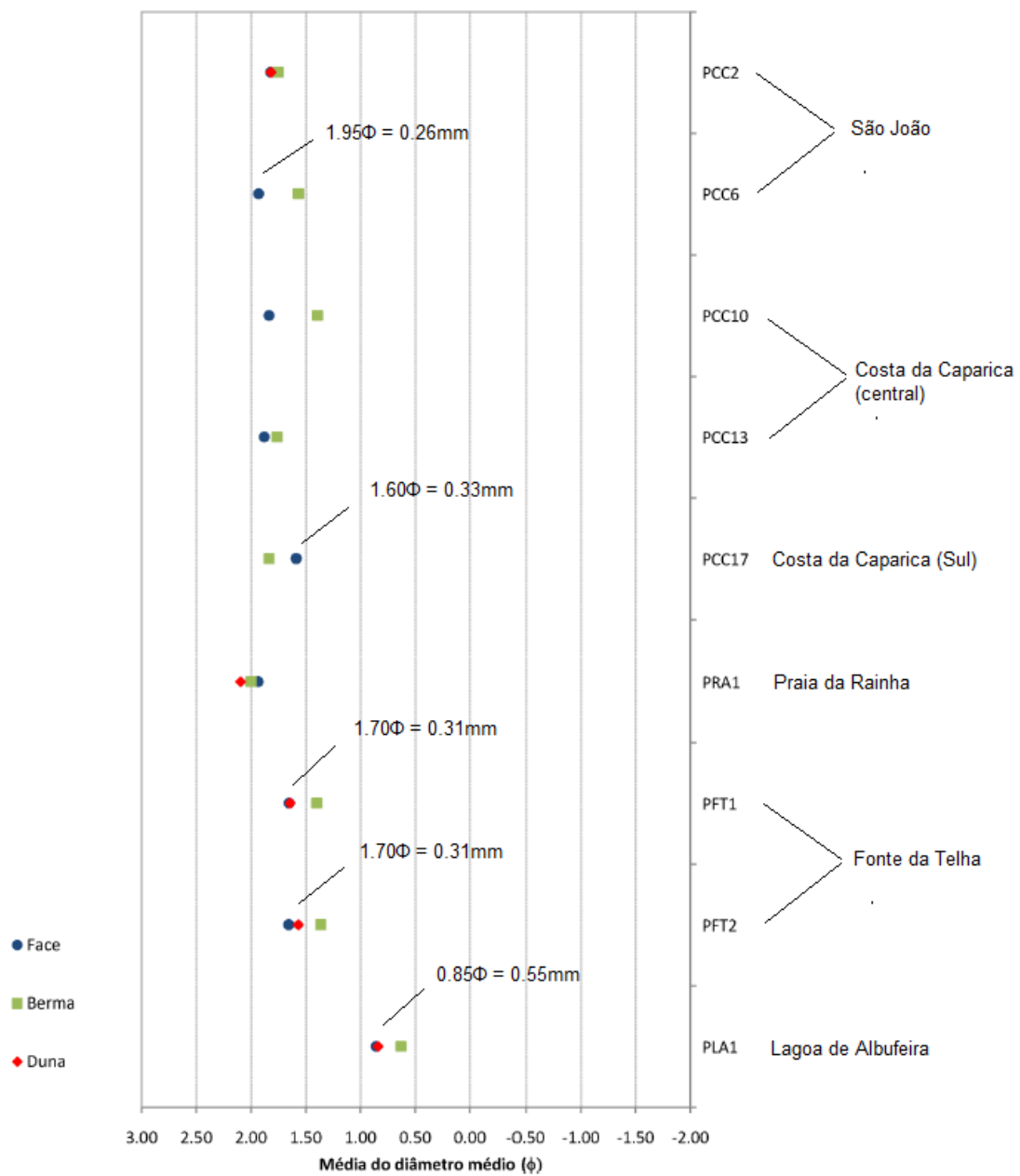


Figura A 1 – Valor médio do diâmetro dos sedimentos da face da praia, berma da praia e duna, retirado de Diogo *et al.*, (2013), onde  $D_{50} = 2^{-\phi}\text{mm}$



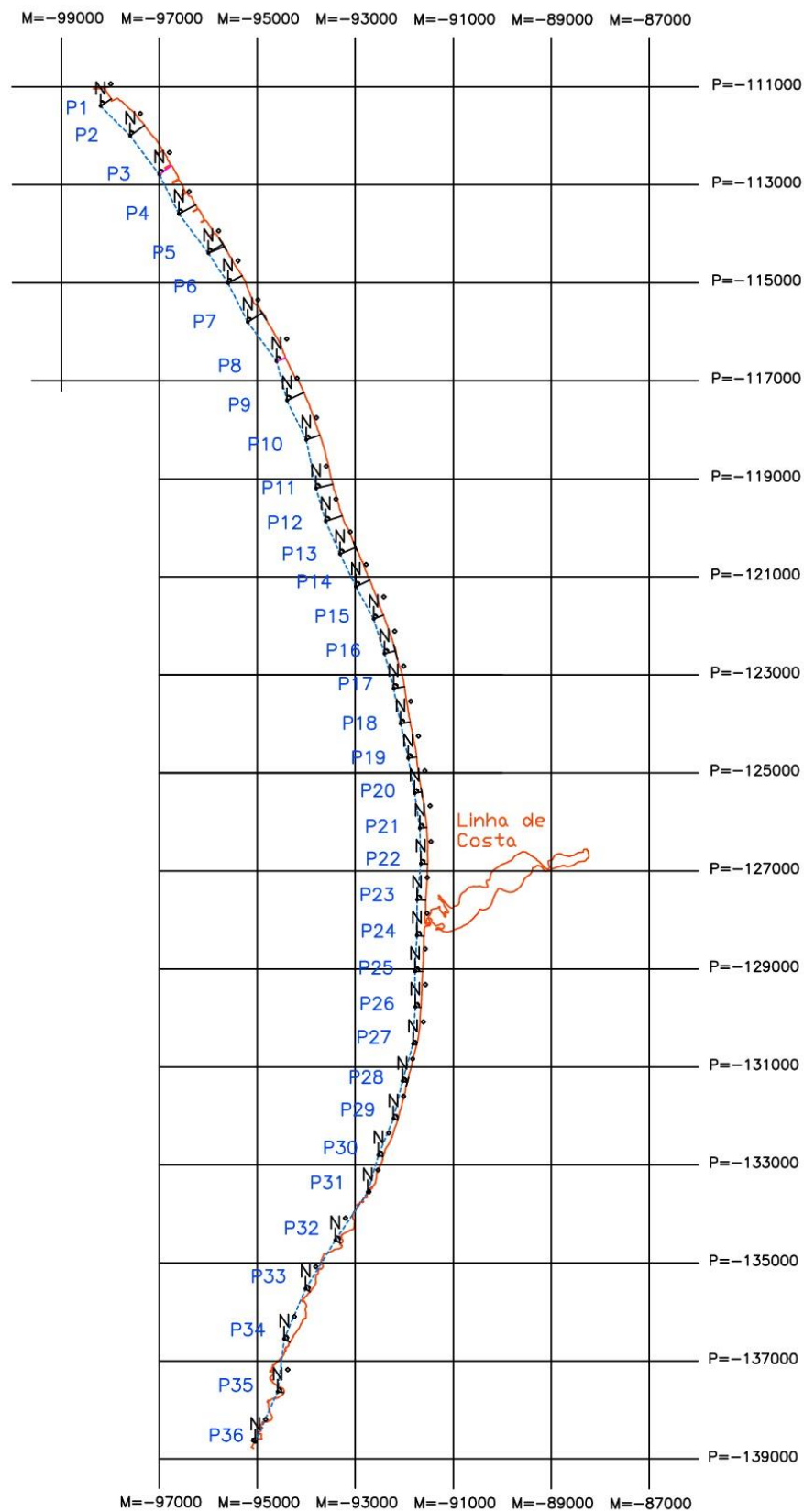


Figura A 2 – Linha de costa e respetivos pontos de estudo obtido pelo programa AutoCAD®